

**УДК 550.89:553.98**

Асс. В.П. Бойправ  
(Днепропетровский государственный  
аграрный университет)

## **АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРИСТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАНУЛЯРНЫХ МОДЕЛЕЙ**

Наведено систематизацію видів шпаруватого простору гірських порід. Розглянуто розрахункові методи визначення проникності і пористості для гранулярних моделей шпаруватого простору. Визначено пористість гірських порід через кут укладання та радіус часток для зцементованих гірських порід.

## **ANALYTICAL METHOD OF POROSITY'S DETERMINATION OF MINE BREEDS WITH THE USE OF GRANULE MODELS**

Systematization of types of porosity space of mountain breeds is resulted. The calculation methods of determination of permeability and porosity for the granule models of porosity space are considered. Porosity of mountain breeds on the corner of piling and radius of particles for cemented mountain breeds is certain.

В механике горных пород и грунтов рассматривают пористость без достаточной взаимосвязи с размерами отдельностей. Для песчаных пород и грунтов такая взаимосвязь устанавливается в виде гранулярных моделей. Они позволяют определить пористость по геологическим данным аналитическими методами. Точность определения пористости, коэффициента фильтрации и проницаемости, полученная таким образом, достаточна при проектировании и моделировании деформационных процессов. Однако существующие гранулярные модели порового пространства недостаточно исследованы. Работа выполнена под руководством М.С.Четверика.

Механический состав грунтов является важной генетической характеристикой почвы. От механического состава горных пород зависят почти все физические свойства: пористость, влагоёмкость, водопроницаемость.

Исследованиями установлено, что частицы горных пород разного размера имеют различный химико-минералогический состав и различные физические свойства (К.Д. Глинка, А.А. Аттерберг, А.А. Роде, Г. Дикий, С.С. Морозов, П.Ф. Мельников, Е.И. Кочерина и др.) [1]. Это обстоятельство и положено в основу классификации частиц.

Для классификации почв по механическому составу было предложено Н.М. Сибирцевым деление частиц на «физический» песок (частицы  $>0,01$  мм) и «физическую» глину (частицы  $<0,01$  мм). По результатам исследований К.Д. Глинки, полное отделение глины от песка не достигается механическим анализом и, если почвенный «ил» или даже весь мелкозем (частицы меньше

0,1 мм) называют иногда глиной, то этот последний термин употребляется как термин физический. Т.е. им обозначаются составные части почвы, имеющие физические свойства глины: взвешиваться в воде, впитывать влагу, набухать, давать в сыром состоянии вязкую массу, ссыхаться, медленно или вообще не пропускать воду. Эти характерные свойства выражены тем сильнее, чем больше в глине самых тонких и «коллоидных» или коагулирующих элементов. Испытывая некоторые сорта глин, Шлезинг нашел, что уже 11 % глины могут цементировать 89% песка в плотные комки [2].

Исследования Зеельгейма [2] показали, что физические особенности, подобные вышеуказанным, принадлежат далеко не одной глине в смысле водного кремнекислого глинозема. Они принадлежат в большей или меньшей степени многим веществам, приведенным в состояние тончайшего измельчения или достигающим студенистого, коллоидного состояния.

Свойства песка, каковым в почвах является обыкновенно кварц и безводные силикаты, считаются противоположными свойствам глины. Песок зернист, раздельно частичен, быстро оседает в воде, слабо связывается при увлажнении, легко пропускает воду, не пластичен, при высыхании рассыпается, не образует компактных масс. Однако по опытам Уитнея, чистый кремнезем, приготовленный в виде тончайшего порошка, обнаруживает некоторые свойства глины: впитывает воду, смоченный водой разбухает, а при высыхании сжимается и твердеет. Из сказанного видно, что особые физические свойства глин обуславливаются главным образом их «иловатостью», т.е. крайней мелкостью или тонкостью частиц. Другие твердые вещества, находящиеся в почвах, могут приближаться к глинам, могут становиться глинообразными в физическом смысле, раз они достигли необходимой для этой степени измельчения, которая, различна для разных веществ.

Сибирцев и другие грунтоведы рассматривают «физическую» глину и «физический» песок с точки зрения формирования почв. Частицы, по крупности приближенные к размерам глинистых частиц, относятся к глине. Но эти составляющие могут быть составными цементированных горных пород, что влияет на прочностные характеристики и физико-механические свойства этих пород. Свойства песчаных почв изменяются в зависимости от крупности составляющих частиц.

В механике горных пород нецелесообразно применение такой классификации почв по механическому составу. Используется классификация предложенная Н.А. Качинским и В.В. Охотиным [3].

Пористость (скважность) почвы – суммарный объем всех пор и пустот в единице объема почвы.

По величине пор общая пористость делится на некапиллярную (диаметр пор  $>1$  мм) и капиллярную ( $<1$  мм). В свою очередь, капиллярная пористость делится на макрокапиллярную (1,0...0,1 мм), мезокапиллярную (0,1...0,001 мм) и микрокапиллярную ( $<0,001$  мм) [4].

Разделение общей пористости по диаметрам составляющих её почвенных капилляров основано на их водоподъемной способности и водопроницаемо-

сти. По водоудерживающей способности различают пассивную и активную пористость (по П.К.Кузьмичу) [4].

К активной пористости относят в естественных условиях породы, которые заполняются водой и освобождаются от нее в результате гравитации, испарения и потребления растениями (некапиллярная, макрокапиллярная, мезокапиллярная). По классификации Н.А. Качинского – межагрегатная, занятая воздухом и внутриагрегатная пористость, занятая капиллярной и рыхлосвязанной водой.

Пассивной можно считать пористость, которая в естественных условиях заполнена прочносвязанной водой, трудно- и неиспользуемой растениями и не испаряющейся при естественно складывающемся температурном режиме почвы. Условно – это объем пор, отвечающей мертвому запасу воды в почве.[4]

Для горных пород по генетическим и морфологическим признакам выделяются несколько типов пористости [5]: межкристаллическая, свойственная кристаллическим и плотно сцементированным породам; межгранулярная (песчаные и крупнообломочные породы); внутригранулярная ; межагрегатная; внутриагрегатная (между первичными частичками, образующими агрегат); пористость выщелачивания (известняки, гипсы).

Поровое пространство горных пород можно представить в виде структурных моделей с характерной конкретной породе геометрии пор и их расположением в пористом теле [5]. Так, поровое пространство рассматривается в виде межзеренных полостей, капилляров, щелей, сферических пустот.

Важнейшим показателем пор являются их размеры.

Поры подразделяются на 3 группы (по Пустовалову Л.В.) [6]:

– сверхкапиллярные размером более 0,5 мм, в которых вода продвигается под влиянием силы тяжести;

– капиллярные размером от 0,5 до 0,002 мм, в которых вода продвигается под влиянием капиллярных сил;

– субкапиллярные размером менее 0,002 мм, в которых вся вода связана с поверхностью частиц молекулярными и электростатическими силами.

В.М. Гольдберг же подразделяет поры на сверхкапиллярные (размер выше 0,1 мм), капиллярные (0,1 до 0,0002 мм) и субкапиллярные (менее 0,0002 мм) [7].

Существуют другие градации пор по размерам.

Выделяются макропоры – размер более 1 мм и микропоры – (субкапиллярные) поры размером менее 0,001 мм (по Сергееву Е.М.) [8]. В ультракапиллярных порах передвижение воды затруднено или отсутствует, так как поры диаметром менее 0,001 мм полностью заполнены связной водой.

Рассматриваются ультрамикропоры (менее 1 мкм, измеряются толщиной гигроскопической водной пленки), межчастичные поры (1-100 мкм), крупные поры, трещинные и трубчатые поры [9].

В зависимости от размера рассматриваемого образца породы, а также от его вида в одной и той же породе могут присутствовать как все виды пор, так

и отдельные.

Горные породы можно представить в виде:

- крупных пластов, в которых наблюдаются геологические нарушения,
- блоков, расчлененных разрывами,
- отдельностей, пересеченных сеткой трещин,
- агрегатов, составляющих отдельности и представленных сложением первичных частиц, поровое пространство в которых представлено межзерненными пустотами и порами.

В связи с этим разделением «от общего к частному» поровое пространство горных пород рассматривается в виде трещин, капилляров и межзерненных пустот, в зависимости от размеров частиц.

В таблице 1 приведены размеры частиц пород и соответствующий вид пустот, а также физические свойства. Размеры пустот и частиц главным образом и определяют их свойства.

Поскольку частицы и поры, особенно сыпучих пород взаимосвязаны, ниже приведены способы установления этих взаимосвязей.

Во многих случаях для определения коэффициента фильтрации пользуются расчетными методами. Это необходимо тогда, когда лабораторными исследованиями определить указанный показатель невозможно, а наличие параметров пород по геологическим данным позволяет провести необходимые расчеты. В основном, определение фильтрационных свойств пород подобным образом производится для песчаных грунтов, у которых частицы имеют форму шара.

Существует несколько способов определения проницаемости, коэффициента фильтрации, используемых в механике горных пород. Рассмотрим их подробнее и сравним, какой из них можно применять в каких случаях.

Вопросы определения проницаемости и пористости наиболее полно рассмотрены в работах В.М. Гольдберга, Е.С. Ромма, Е.Г. Чаповского.

Под проницаемостью понимается способность пористой среды (горных пород) пропускать через себя жидкости и газы. Она проявляется в фильтрационных свойствах породы, характеризуемых коэффициентом фильтрации  $k$  и коэффициентом проницаемости  $k_n$ . Эти два параметра связаны между собой соотношением:

$$k = k_n(\gamma/\mu), \quad (1)$$

где  $\gamma$  и  $\mu$  – плотность и вязкость фильтрующей жидкости. Следовательно, коэффициент фильтрации является комплексным параметром, отражающим как свойства породы (через коэффициент проницаемости  $k_n$ ), так и свойства фильтрующей жидкости (через её плотность и вязкость) [8].

Таблица 1 - Пустотность и частицы

Пустоты			Первичные частицы пород			
Размер, мм	Классификация		Размеры частиц, мм			
	По ширине	По глубине залегания	>2	Песчаные 2-0,05	Пылеватые 0,05-0,001	Глинистые <0,001
Трещины	>100	Очень крупные				
	20-100	крупные				
	5-20	средние				
	1-5	мелкие				
	1	тонкие				
	0,5-1	микротрещины				
Капилляры	1-0,5	сверхкапилляры		-	Передвижение воды под силой тяжести	Передвижение воды до 0,1 мкм. Для частиц <0,005мм наблюдается набухание. Для <0,001 проявляются свойства пластичности.
	0,5-0,002	капилляры		-	Под действием капиллярных сил. Если >0,1 Капиллярного поднятия нет и вода под действием силы тяжести	
	0,002-0,001	субкапилляры		Поры содержат свободную гравитационную воду. Капиллярной воды нет. Под действием молекулярных и электростатических сил	-	
Межзернистые пустоты	0,5			Капиллярного поднятия нет. Вода под действием силы тяжести.		
	>0,1					
	0,5-0,05	проводящие				
	0,05-0,0005	сохраняющие				

Коэффициент проницаемости определяется по формуле:

$$k_n = d_s^2 Sl(n, \epsilon), \quad (2)$$

где  $d_e$  – эффективный диаметр частиц, слагающих пористую среду;  $Sl$  – безразмерный коэффициент (число Слихтера), зависящий от пористости породы и структуры порового пространства. Пористость  $n$  является основным параметром, определяющим величину показателя  $Sl$  и коэффициента проницаемости в целом. При увеличении пористости от 0,3 до 0,4 коэффициент проницаемости в песках возрастает примерно в 3 раза, а в глинах – на несколько порядков [8]. Показатель  $Sl$  зависит не только от пористости, но и от структуры порового пространства, характеризуемой безразмерным параметром  $\epsilon$ . Этот параметр в свою очередь зависит от формы слагающих породу частиц и от так называемого «коэффициента извилистости». Под ним обычно понимается отношение кратчайшего расстояния между двумя точками в направлении потока к длине извилистого пути частицы жидкости через поровые каналы.

В выражении (2) входят только параметры пористой среды. По определению и физическому смыслу коэффициент проницаемости не должен зависеть от фильтрующегося флюида (воды, нефти, газа) и химического состава подземных вод. Поэтому коэффициент проницаемости должен был бы иметь постоянное значение независимо от свойств фильтрующейся жидкости.

Однако из практики известно, что коэффициент проницаемости породы существенно изменяется в зависимости от характера флюида, его химического состава, температуры и гидродинамического напора, а также может изменяться во времени. Изменения проницаемости пород объясняется процессами физико-химического взаимодействия между жидкой и твердой фазами, изменением свойств поровой жидкости под влиянием температуры, вовлечением в движение при повышенных градиентах потока пористенных слоев жидкости, перегруппировкой зерен, закупоркой одних пор и раскупоркой других. Все это приводит к изменению структуры порового пространства, размеров пор и, в итоге, изменению проницаемости.

Таким образом, коэффициент проницаемости породы зависит от свойств фильтрующейся жидкости и термодинамической обстановки, в которой находится водоносная система.

Если пренебречь вышеперечисленными факторами термодинамической обстановки, то можно сказать, что проницаемость горных пород зависит от пористости.

В работах Л.С. Лейбензона, И. Козени, К. Терцаги, Д. Слихтера, создавших теорию фильтрации, установлена функциональная зависимость между пористостью и проницаемостью, но только для фиктивных и идеальных грунтов. Что же касается реальных горных пород, то функциональной связи пористости с проницаемостью не обнаружено.

Для отдельных типов пород может иметь место корреляционная зависимость между пористостью и проницаемостью. Это отмечают А.М. Пирвердян, А.А. Ханин, У. Рассел и др. Установлено, что проницаемость растет гораздо быстрее пористости. Так, по А.А. Ханину, при увеличении пористости песчаных отложений в 1,5-2 раза (от 5 до 10%) проницаемость возрастает почти в 10 раз (от 0,01 до 0,1 мкм<sup>2</sup>).

Проницаемость зависит главным образом от размера и характера поровых каналов (сквозные поры или тупиковые), которые в свою очередь определяются литологией пород, их происхождением, составом цемента, наличием коллоидных фракций.

Поровые каналы имеют сложное извилистое строение. Поэтому при изучении фильтрации пользуются упрощенными моделями пористой среды. Таковыми являются идеальный и фиктивный грунт. Под идеальным грунтом понимается пористая среда, поровые каналы которой представляют пучок цилиндрических трубок с параллельными слоями. Фиктивным грунтом называется пористая среда, составленная из шарообразных частиц одинакового размера.

Простейшая гранулярная модель нецементированной горной породы представляет собой конгломерат различным образом упакованных сферических частиц одинакового размера (модель Сликтера). Е.С. Ромм рассматривает гранулярные модели пористой среды [6], ближайшие по структуре к реальным насыпным грунтам или нецементированным песчаникам. В.М. Гольдберг грунты, рассматриваемые в модели Сликтера, называет фиктивными и считает, что он большей степени соответствует реальной пористой среде [8].

В этой модели связана пористость с основной и единственной характеристикой геометрии пор – углом укладки сферических частиц (шаров)  $\beta$ . С этой же характеристикой связан и коэффициент проницаемости.

Согласно данной модели пористость можно определить следующим образом

$$n = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos \beta) \sqrt{1 + 2 \cos \beta}} \quad (3)$$

Может быть два крайних случая укладки частиц: наиболее свободная и наиболее плотная [2, 3, 4, 8]. Эти два вида укладки различаются величиной угла  $\beta$ : при свободной укладке  $\beta=90^\circ$ , при плотной укладке  $\beta=60^\circ$  (рис. 1).

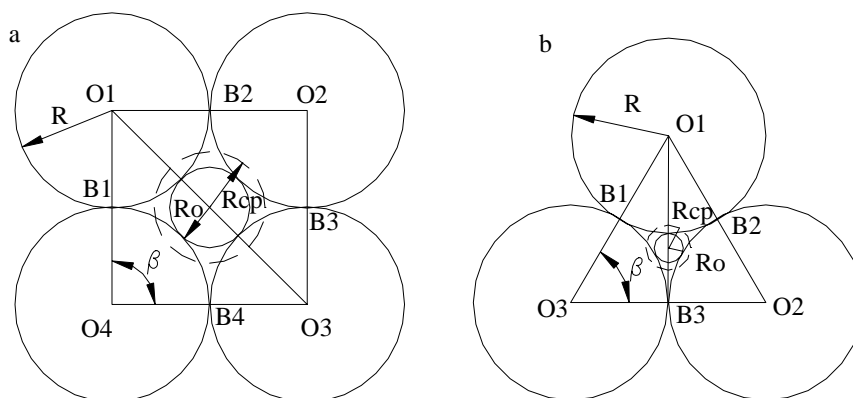


Рис. 1 – Вид наиболее свободной (а) и наиболее плотной (б) укладки шаров в фиктивном грунте (по Гольдбергу)

Модель Слихтера и Гольдберга имеет недостаток, который заключается в том, что пористость рассматривается только исходя из угла укладки частиц, и не учитывается их размер.

Можно посмотреть, как изменяется пористость от угла укладки частиц. Этому вопросу Гольдберг и Слихтер в своих работах не касались.

Изменение пористости в зависимости от различного угла укладки  $\beta$  в пределах от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  представлено в виде графика (рис. 2).

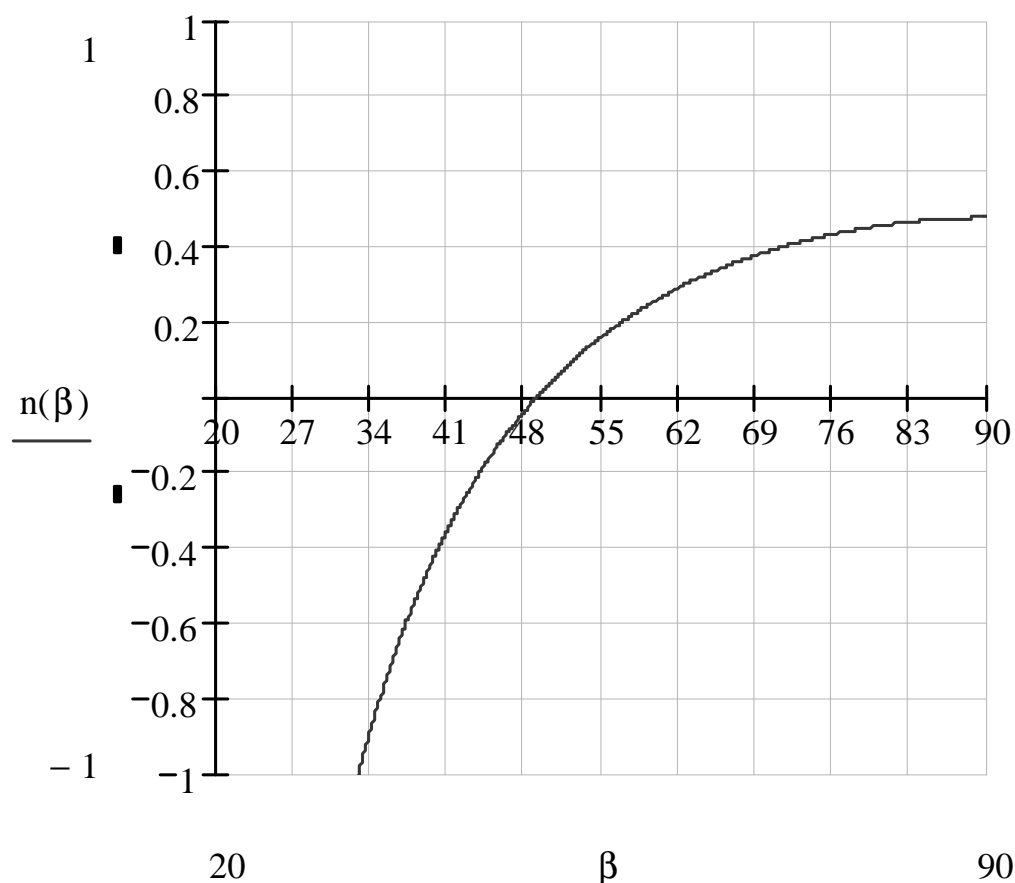


Рис. 2 – Зависимость пористости от угла укладки частиц в грунте

Как видно, наличие пористости при углах  $\beta < 49^\circ$  не реально (значение отрицательно). При углах, больших указанного значения, пористость существует и достигает максимального значения  $n=0,476$  при  $\beta=90^\circ$ . В работах Е.С. Рома и В.М. Гольдберга указывается минимальное значение пористости  $n=0,26$  при  $\beta=60^\circ$ . Данный график показывает, что при угле укладки от  $49^\circ$  до  $60^\circ$  пористость принимает значения в пределах от 0 до 0,26.

Ниже приведено определение размеров пор горных пород через радиус частиц, их составляющих [8].

Рассматривается неплотная и плотная укладки частиц фиктивного грунта.

При неплотной укладке поровое пространство между четырьмя шарами одинакового радиуса  $R$  имеет форму, характеризуемую фигурой  $B_1B_2B_3B_4$  (рис. 1а). Площадь  $F_o$  этой фигуры может быть вычислена как разность между



площадью  $F_k$  квадрата  $O_1O_2O_3O_4$  и суммарной площадью  $F_c$  четырёх секторов  $O_1B_1B_2$ ,  $O_2B_2B_3$ ,  $O_3B_3B_4$ ,  $O_4B_4B_1$  (угол  $\beta$  отдельного сектора равен  $90^\circ$ ):

$$F_o = F_k - F_c = 4R^2 - 4 \frac{\pi\beta R^2}{360} \quad (4)$$

Отсюда радиус равновеликого круга, имитирующего пору, можно выразить

$$R_{cp} = \sqrt{\frac{4R^2(1 - \frac{\pi\beta}{360})}{\pi}} \quad (5)$$

$$R_{cp} \approx 0.45R.$$

В случае плотной укладки шаров (образована 3-мя шарами) пора имеет форму криволинейного треугольника  $B_1B_2B_3$  (рис. 16). Его площадь  $F_o$  равна разности между площадью равностороннего треугольника  $O_1O_2O_3$  и суммарной площадью трех секторов  $O_1B_2B_1$ ,  $O_2B_3B_2$ ,  $O_3B_1B_3$  (угол  $\beta$  отдельного сектора равен  $60^\circ$ ). В результате получаем

$$F_o = 2R^2 - 3 \frac{\pi\beta R^2}{360} \quad (6)$$

Отсюда, средний радиус поры, можно определить по формуле

$$R_{cp} = \sqrt{\frac{R^2(2 - \frac{\pi\beta}{120})}{\pi}} \quad (7)$$

$$R_{cp} \approx 0.23R.$$

На рисунке 3 показана зависимость радиуса пор от радиуса частиц для укладки под углами  $60^\circ$  и  $90^\circ$ , полученная по формулам (5) и (7).

Графики показывают значения средних радиусов пор, рассчитанных по радиусам частиц для различного типа породы и угла укладки. Так, для породы, состоящей из частиц радиусом 0,5 мм с плотной укладкой шаров ( $\beta=60^\circ$ ) средний радиус пор составляет  $R_{cp}=0,18$  мм, с наиболее свободной укладкой ( $\beta=90^\circ$ )  $R_{cp}=0,26$  мм.

Выражения (5) и (7) можно использовать для определения среднего радиуса пор при различных углах укладки, отличных от  $90^\circ$  и  $60^\circ$ , но образованных четырьмя и тремя шарами соответственно.

Попытки вывести обобщающую формулу для упаковок тремя и четырьмя шарами привели к недостоверным результатам.

Таким образом, по размеру частиц можно оценить размер пор. Конечно, это относится к фиктивному грунту, но, тем не менее, на основе такой оценки можно получить представления о порядке размеров пор в реальных грунтах.

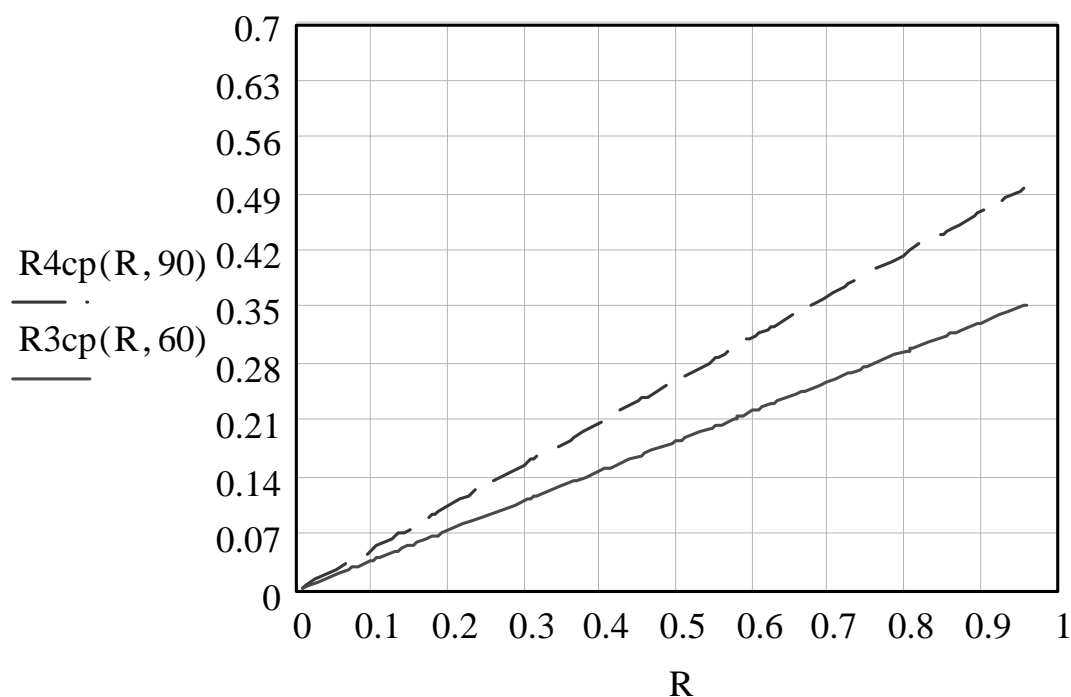


Рис. 3 – Зависимость среднего радиуса пор от радиуса частиц с учетом угла укладки

Наличие пылеватых, глинистых и коллоидных частиц в горных породах («физической» глины и «физического» песка по Сибирцеву) существенно влияет на свойства породы и грунта. Но в случае цементации, затвердевания пород они еще влияют на прочностные характеристики и физико-механические свойства.

В работе приведено зависимость свойств пород от размеров слагаемых частиц и вида порового пространства, а также присущие им свойства. Представлена зависимость пористости от угла укладки частиц, а также размера пор пород, сложенных шарообразными частицами, от размера частиц.

По результатам проведенных исследований, установлено, что пористости при углах укладки частиц менее  $49^\circ$  не существует.

Соотношение размера пор и размера частиц, представленное на рис.3 еще не говорит о пористости, поскольку, чем меньший размер у частиц породы или грунта, тем больше пористость.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств и грунтов. Изд.2-е. Учеб. Пособие для студентов вузов (специальность «Агрохимия и почвоведение»). М.: Высшая школа, 1973. – 399 с.
2. Сибирцев Н.М. Избранные сочинения. Том 1. Почвоведение. М.: Гос. изд-во сельхоз. Литературы, 1951. – 473 с.
3. Бабков В.Ф., Безрук В.М. Основы грунтоведения и механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1986. –

239 с.

4. Мелиоративное почвоведение с основами гидрологии/ Под ред. С.Т. Вознюка и П.К.Кузьмича. – Львов: Вища школа, 1984. - 264 с.
5. Ломтадзе А.М., Ломтадзе В.Д. Руководство по инженерно-геологическому изменению глинистых пород. М., Энергия, 1970.
6. Ромм Е.С. Структурные модели порового пространства горных пород. – Л.: Недра, 1985. – 240 с.
7. Чаповский Е.Г. Инженерная геология (Основы инженерно-геологического изучения горных пород). Учебное пособие для студентов геолог. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1975. – 296 с.
8. Гольдберг В.М., Скворцов Н.П. Проницаемость и фильтрация в глинах. М.: Недра, 1986. – 160 с.
9. Сергеев Е.М. Грунтоведение. Изд-во МГУ, 1971.
10. Ларионов А.К. Инженерно-геологическое изменение структуры рыхлых осадочных пород. М.: Недра, 1966.

**УДК 622.268.13:622.833.3.001.24**

Асп. Е.А. Бубнова  
(ИГТМ НАН Украины)

### **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОЖИДАЕМЫХ СМЕЩЕНИЙ КОНТУРА ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ И ВЫБОРА МЕСТА ЕЕ ЗАЛОЖЕНИЯ В СДВИГАЮЩЕМСЯ МАССИВЕ**

Приведено методику розрахунку очікуваних зсувів контуру виробки виходячи зі зрушення масиву гірських порід, що підроблюється. Розроблено рекомендації з вибору місця закладення підготовчих виробок і напрямку ведення очисних робіт щодо геометричних елементів залягання вугільного пласту.

### **THE TECHNIQUE OF ACCOUNT OF PREPARATORY WORKING EXPECTED DISPLACEMENT AND CHOICE OF A PLACE IT CONTOUR INTERVAL IN A DISPLACEMENT MASS**

The technique of account of a contour of working expected displacement proceeding from displacement of underworking rock mass is given. The recommendations are developed at the choice of a place of preparatory working contour interval and direction of breakage works conducting concerning geometrical elements coal seam bedding.

Одним из основных технико-экономических показателей эффективности работы шахты является проведение и охрана подготовительных выработок. В шахтах Донбасса при мощности угольных пластов 1 м и более применяют в основном столбовые системы разработки с отработкой горизонта обратным ходом. Для этих систем, требующих заблаговременную подготовку шахтного поля, вопрос безремонтного поддержания выработок на протяжении всего срока их эксплуатации является особенно актуальным.

Научно-исследовательские работы и опыт шахт показали, что даже на больших глубинах в сложных горно-геологических условиях, возможно обеспечить безремонтное поддержание выработок при условии правильного выбора их расположения в массиве, способов и параметров охраны и средств поддержания на основе расчетов параметров сдвижения массива и смещений контура выработок.

Для определения смещений контуров выработок используют математиче-