

В.П. Бойправ, ассистент,
Днепропетровский государственный
аграрный университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГРУНТОВ ПРИ ИХ ПРЕДСТАВЛЕНИИ ГРАНУЛЯРНЫМИ МОДЕЛЯМИ

Розглянуто аналітичні методи визначення розмірів шар і пористості ґрунтів, що складені частками різного розміру. Визначено питомі і сумарні поверхні часток різних ґрунтів, які представлені гранулярними моделями. Наведено класифікацію ґрунтів за граничними значеннями сумарної поверхні часток.

DETERMINATION OF BREEDS' PARAMETERS AT THEIR PRESENTATION BY GRANULE MODELS

The analytical methods of determination of pores' sizes and breeds' porosity formed by the different particles are considered. The specific and total surfaces of particles for the granule models are certain. Classification of breeds by maximum values of particles' total surface is resulted.

Раздробленные несвязные горные породы, грунты, размерами менее 2,0 мм представляют в виде песков, пылеватых и глинистых частиц. Такими же видами частиц характеризуют отходы обогащения рудных полезных ископаемых, грунты, образовавшиеся в результате выветривания, потенциально плодородные породы при горнотехнической рекультивации земель и др. Тип грунта определяют по диаметрам частиц и их весовому составу, что не всегда характеризует его особенности. Поэтому определение параметров грунтов, таких как пористость, удельная поверхность, которые оказывают влияние на их свойства путем представления грунтов гранулярными моделями весьма актуально. (Работа выполнена под руководством профессора М.С.Четверика).

При дроблении частиц породы одного минералогического состава при уменьшении их размеров частицы хоть и являются самоподобными по форме как фрактальные однородности [1, 2], но не являются самоподобными по свойствам. При этом каждый иерархический уровень для данного типа геологической структуры обладает отдельной характеристикой [3].

Так, например, кварцевый песок при дроблении до размера пылеватых частиц обладает свойствами лессовидных (пылеватых) пород, которые на 60-70% состоят из кварца. При дальнейшем дроблении кварцевых песков до размеров глинистых частиц они обладают некоторыми свойствами глин [4]. В то же время дегидратация неглинистых минералов не зависит от крупности зерен [5]. Изменение свойств при дроблении характерно и для угля. Так, например, образование угольной пыли определенной крупности и концентрации в воздухе при соответствующих условиях может приводить к взрыву.

В зависимости от размера частиц с использованием аналитических гранулярных моделей определяют различные свойства: коэффициент разрыхления при взрывном разрушении [6], пористость [7, 8, 9]. В то же время исследования грунтов с использованием гранулярных моделей для определения удельной поверхности частиц отсутствуют.

Следуя [6], рассмотрим аналитическое описание закономерностей изменения пористости в зависимости от фракционного состава горной породы.

Предположим, что объем V имеет форму параллелепипеда с размерами $(2Ra \times 2Rb \times 2Rc)$ и в нем находится $N = abc$ частиц (шаров) одинакового радиуса (рис. 1).

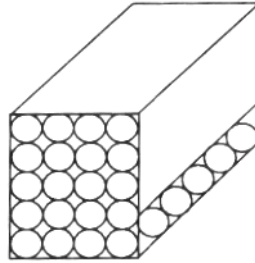


Рис. 1 – Схема заполнения объема шарами одного радиуса

Объемы V , в котором находится N шаров, и V_n , который занимают N шаров, равны (1) и (2) соответственно

$$V = 8abcR^3, \quad (1)$$

$$V_n = \frac{4}{3}\pi abcR^3. \quad (2)$$

Тогда пористость горной породы n будет равна

$$n = \frac{V_{nop}}{V} = \frac{4abcR^3 \left(2 - \frac{\pi}{3}\right)}{8abcR^3}, \quad (3)$$

$$n = 1 - \frac{\pi}{6} = 0,477.$$

Полученное аналитически определенное значение пористости соответствует фактически измеренной пористости мелкого песка [11].

Если радиус каждого шара уменьшить в m раз, его радиус равен R/m . Тогда объем каждого моношара составит

$$V_o = \frac{4}{3}\pi (R/m)^3, \quad (4)$$

а их количество будет равно

$$m \times n = \frac{2Ra}{2R/m} \cdot \frac{2Rb}{2R/m} \cdot \frac{2Rc}{2R/m} = abc m^3.$$

Суммарный объем всех уменьшенных шаров

$$V_{m,n} = \frac{4}{3} \pi abc m^3 (R/m)^3 = \frac{4}{3} \pi abc R^3. \quad (5)$$

Поскольку объем V остался неизменным ((5) соответствует (2)), то пористость осталась также неизменной и составляет

$$n = \frac{4abcR^3(2 - \frac{\pi}{3})}{8abcR^3} = 1 - \frac{\pi}{6} = 0,477.$$

Вышеизложенное показывает, что пористость горной породы, сложенной частицами одного размера, не зависит от их размера и, как видно, аналитическое описание закономерностей пористости и размера частиц в данном случае противоречит реальному положению [11].

Если рассмотреть массив рыхлого грунта, образованный частицами разной крупности, и составленный таким образом, что диаметр самых мелких частиц не меньше поперечных размеров поры между самыми крупными зернами данного грунта (рис. 2а), то получим следующее.

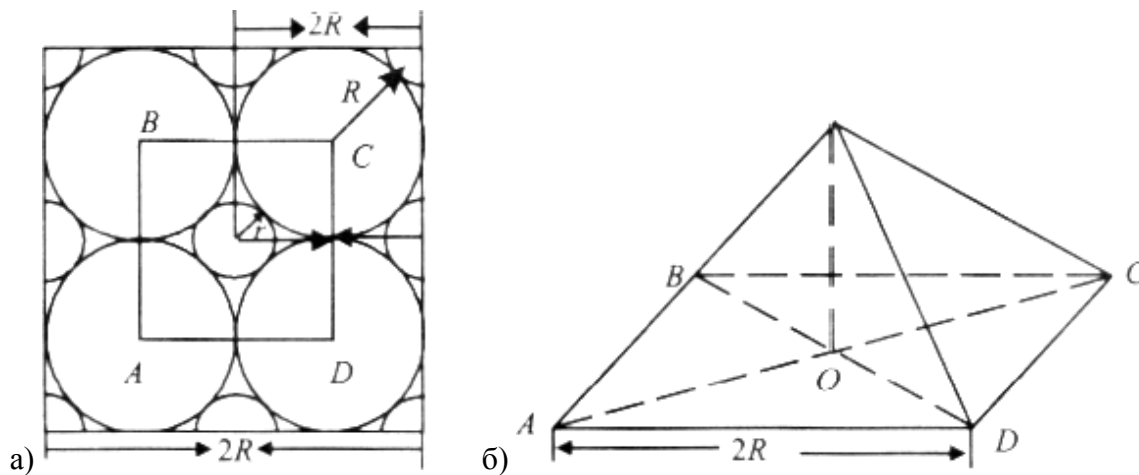


Рис. 2 – Схема к расчету пористости при укладке частиц различного радиуса ($\beta=90^\circ$)

В пустоты между частицами радиуса R вписаны частицы радиуса $r < R$. Если соединить центры четырех попарно касающихся друг друга частиц радиусом R с центром частицы радиусом r , получается правильная пирамида с основанием $2R$ и боковым ребром $(R+r)$ (рис. 2б).

Суммарный объем, занимаемый частицами

$$V_n = \frac{4}{3}\pi(r^3 + R^3). \quad (6)$$

Из пирамиды (см. рис. 2б)

$$SA^2 = OA^2 + SO^2; \quad OA = R\sqrt{2}; \quad SA = R + r; \quad SO = R.$$

Отсюда,

$$r = 0,732R. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (8), определив пористость по (3), получаем $n=0,271$.

Как видно, при укладке частиц таким образом, что между крупными помещены более мелкие частицы ($\beta=90^\circ$) (рис. 2а), значение пористости уменьшилось с 0,477 до 0,271.

При угле укладки частиц радиуса R $\beta=60^\circ$ и размещении между ними частиц радиусом r , по вышеуказанным соображениям получена следующая зависимость между радиусами этих частиц:

$$r = 0,2247R. \quad (8)$$

При такой укладке частиц значение пористости получено $n=0,251$. Как видно пористость уменьшилась незначительно по сравнению с упаковкой частиц одинакового размера $n=0,258$ [9], т.е. при укладке частиц крупных под углом 60° наличие в пустотах мелких на пористость не влияет.

В работах [8, 12] радиус частиц r предложено вычислять как наибольший радиус круга, вписанного в диаметрально сечение поры между однородными шаровыми частицами, при углах конфигурации $\beta=90^\circ$ и $\beta=60^\circ$ по (9) и (10) соответственно.

$$r = 0,414R, \quad (9)$$

$$r = 0,155R. \quad (10)$$

Данные размеры получены по формулам радиусов узких капилляров, которые намного ниже аналитически рассчитанных значений (7) и (8).

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.

В грунтах частицы могут быть представлены различными минералами, в узлах кристаллической решетки которых могут находиться атомы или ионы. Так, в узлах кристаллической решетки кварца, являющегося основным породообразующим минералом песчаных и пылеватых частиц, находятся атомы, чем и объясняется его низкая активность и стойкость к химическим воздействиям. В узлах кристаллической решетки глинистых минералов расположены ионы, чем и вызвана их высокая активная поверхность. Причем, если удель-

ная поверхность каолинита (основного породообразующего минерала) составляет 25-30 м²/г, то монтмориллонита – 400-800 м²/г [13].

Так как, песчаные, пылеватые и глинистые частицы представлены не непосредственно кристаллами, а их соединениями, то удельная поверхность будет различной.

Для определения величины удельной поверхности частиц в единице объема различных грунтов, представленных в виде гранулярных моделей, и для определения закономерности её изменения принято для песчаных частиц шарообразная (рис. 3а), для пылеватых – кубовидная формы (рис. 3б), для глинистых – форма параллелепипеда (рис. 3в).

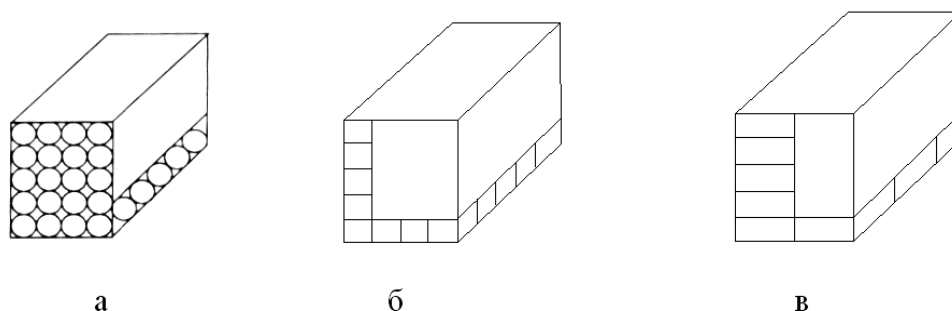


Рис. 3 – Схема заполнения единицы объема частицами шарообразной (а), кубовидной (б) формы и параллелепипеда (в)

Удельная поверхность для этих видов заполнения определяется по формулам (11), (12), (13) для частиц шарообразной, кубовидной и формы параллелепипеда соответственно.

$$S_{ш} = \frac{\pi}{D} \cdot a^3, \quad (11)$$

$$S_{куб} = \frac{6a^3}{l}, \quad (12)$$

$$S_{ПАРАЛ} = \frac{2a^3(K_b + K_b \cdot K_c + K_c)}{l \cdot K_b \cdot K_c}, \quad (13)$$

где a^3 – объем, в который помещены частицы; D – диаметр шарообразных частиц; l – длина ребра кубовидных частиц; K_b - коэффициент ширины параллелепипеда; K_c - коэффициент высоты параллелепипеда.

Если принять размер частиц одинаковым $D=l=b=10^{-5}$ м, $K_c = 0,5$, $K_b = 0,2$ для этих моделей, то получим удельную поверхность частиц, заполняющих единицу объема 1 см²: $S_{ш} = 314$ м², $S_{куб} = 600$ м², $S_{ПАРАЛ} = 1600$ м².

Как видно, удельная поверхность шарообразных частиц в единице объема минимальная.

В работе шарообразными представлены песчаные частицы ($D=0,05-2,0$ мм), кубовидными – пылеватые ($D=0,05-0,005$ мм), формы параллелепипеда – глинистые ($D < 0,005$ мм).

Для вышеперечисленных частиц на рисунке 4 представлено изменение их удельной поверхности.

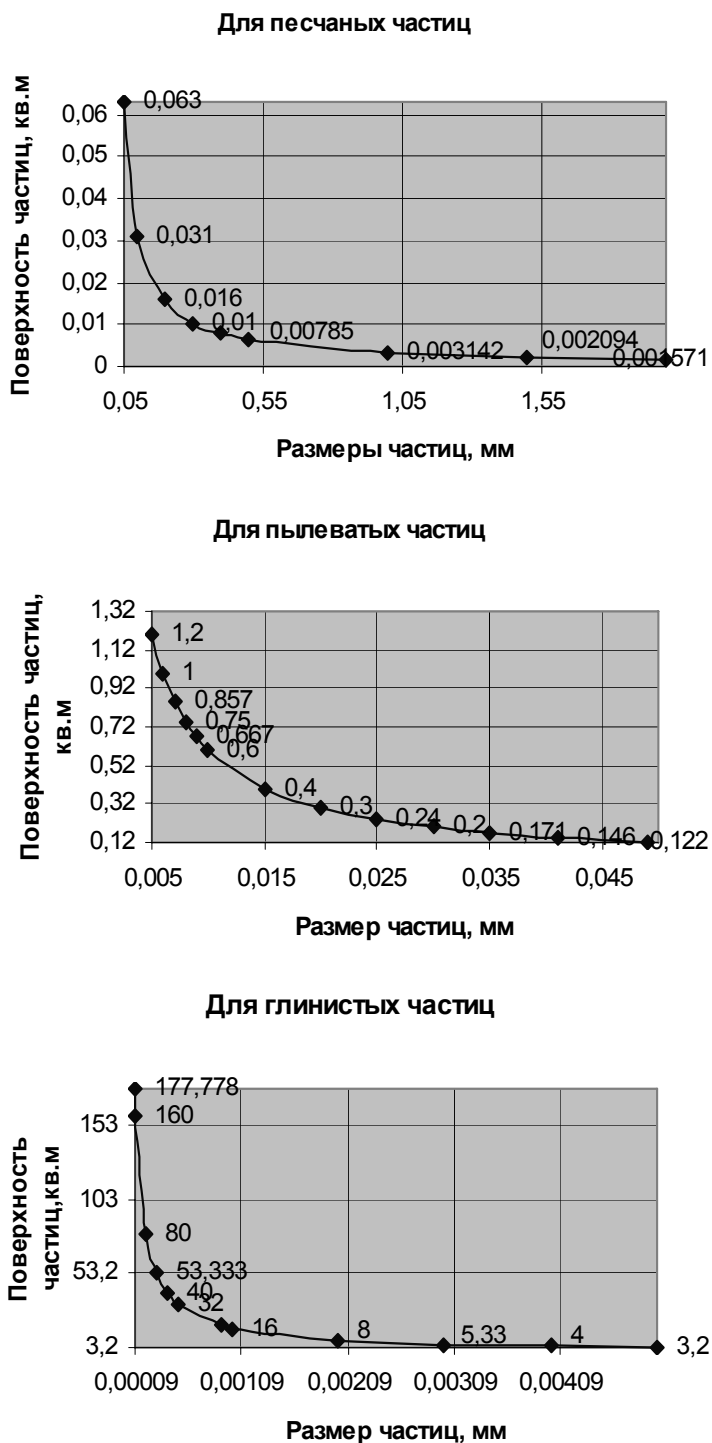


Рис. 4 – Изменение поверхности частиц в единице объема

Как видно с графиков, удельная поверхность частиц, составляющих единицу объема несвязной горной породы, возрастает гиперболически.

Получено, удельная поверхность песчаных частиц в единице объема 1 см^2 изменяется в пределах $0,001571-0,063 \text{ м}^2$, пылеватых – $0,122-1,2 \text{ м}^2$, глинистых от $3,2 \text{ м}^2$ и более.

Наибольшее значение удельной поверхности достигается у глинистых частиц за счет минимальных размеров и может достигать $2000-5000 \text{ м}^2$ в зависимости от минералогического состава: монтмориллонит или каолинит.

По полученным результатам можно сделать вывод, что частицы, имеющие наибольшее значение удельной поверхности за счет минимальных размеров, обладают большой поверхностной энергией.

Эти результаты могут являться основой классификации грунтов, включающей не только размеры частиц, но и их удельную поверхность.

В основу классификации грунтов, предложенной Охотиным (1940г.) и используемой в настоящее время в механике грунтов, положен количественный (весовой) учет содержащихся в грунтах глинистых частиц.

В работе по соотношению трех основных групп фракций песчаных, пылеватых и глинистых частиц в грунтах определена суммарная поверхность частиц в единице массы грунта 1 г . Среднее значение удельного веса песка принято $2,65 \text{ г/см}^3$. Значения удельных поверхностей в 1 см^3 для песчаных, пылеватых и глинистых частиц по граничным значениям фракций получены по (11), (12) и (13). Для глинистых частиц минимальный размер принят $0,00001 \text{ мм}$.

По результатам расчетов классификацию Охотина можно представить в виде таблицы 1.

Значения суммарной поверхности частиц для нижней границы соответствуют минимальным размерам частиц каждой фракции, для верхней – максимальным.

Как видно из таблицы, с увеличением содержания глинистых частиц увеличивается их суммарная поверхность. Изменение суммарной поверхности частиц в зависимости от весового состава глинистых частиц в % представлено на рисунке 5.

Как видно, изменение суммарной поверхности происходит прямо пропорционально содержанию глинистых частиц.

При одинаковом содержании глинистых частиц в грунтах (варианты 6 и 7, 12 и 13) и различном составе пылеватых и песчаных суммарная поверхность изменяется незначительно - в пределах сотых долей, что показывает значимую роль глинистых частиц в составлении классификации грунтов. Поскольку, обладая избыточной энергией, вследствие размещения ионов в узлах кристаллической решетки они являются очень активными и оказывают решающее влияние на свойства и поведение дисперсных грунтов.

В данной работе представлена зависимость пористости от угла укладки частиц, а также от их размера. В работе рассмотрены различные схемы формирования грунтового массива: одномерными частицами, случай расположе-

ния между частицами частиц меньшего размера при свободной и плотной укладке частиц. Для этих случаев определена пористость и приведена зависимость между размерами частиц. Определены удельные поверхности для песчаных, пылеватых и глинистых частиц в единице объема, на основании чего установлено гиперболическое увеличение значения удельной поверхности с уменьшением размеров частиц.

Таблица 1 – Классификация грунтов

№ варианта		Название грунта	Содержание частиц, %			Суммарная поверхность частиц в 1 г грунта	
			песчаных 0,05-2 мм	пылеватых 0,005- 0,05мм	глинистых <0,005 мм	нижняя граница	верхняя граница
1	Песчаный	Песчаный	85	13	2	12.154	0.031
2		Песчаный пылеватый	52	46	2	12.296	0.045
3	Пылеватый	Супесь легкая пылеватая	47	50	3	18.351	0.059
4		Супесь тяжелая пылеватая	30	60	10	60.656	0.148
5		Супесь тяжелая	59	32	9	54.499	0.124
6	Глинистый	Суглинок пылеватый	36	52	12	72.697	0.169
7		Суглинок легкий	55	33	12	72.615	0.16
8		Суглинок средний пылеватый	37	45	18	108.892	0.238
9		Суглинок средний	50	30	20	120.902	0.255
10		Суглинок тяжелый	50	25	25	151.068	0.314
11		Глина	25	35	40	241.674	0.499
12		Глина	20	20	60	362.359	0.734
13		Глина	10	30	60	362.402	0.738
14	Глина	10	20	70	422.734	0.854	

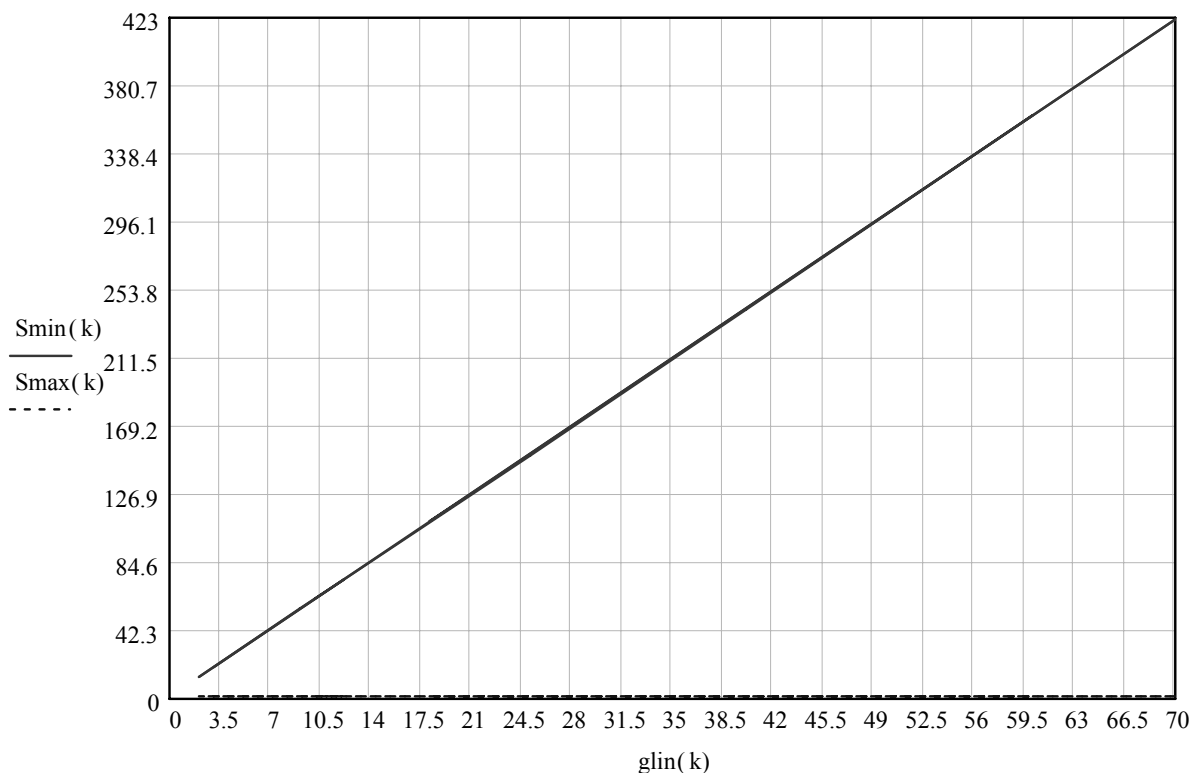


Рис. 5 – Зависимость суммарной поверхности частиц (по вертикали) в зависимости от весового состава глинистых частиц в % (по горизонтали)

В статье приведена классификация грунтов по граничным значениям суммарной поверхности частиц и её зависимость от весового состава глинистых частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат А.Ф., Дырда В.И. Фракталы в геомеханике. – К.: Наукова думка, 2005. – 358 с.
2. Макаров П.В., Трубицин А.А. Ворошилов С.П. Самоподобие разрушения углей и эволюция нагружаемых твердых тел.
3. Горайнов С.В. Иерархия резкостных геологических тел. – Харьков:, 2001. – 564 с.
4. Сибирцев Н.М. Избранные сочинения. Том 1. Почвоведение. М.: Гос. изд-во сельхоз. Литературы, 1951. – 473 с.
5. Кульчицкий Л.И. К определению понятия глинистых минералов./ Известия Академии Наук СССР. Серия геологическая. – 1969. – №3. – С. 88-98.
6. Крысин Р.С., Новинский В.В. Модели взрывного дробления горных пород. – Д.:АРТ-ПРЕСС, 2006. – 144 с.
7. Ромм Е.С. Структурные модели порового пространства горных пород. – Л.: Недра, 1985. – 240 с.
8. Вахрамеев И.И. Теоретические основы тампонажа горных пород. – М.: Недра, 1968. – 291 с.
9. Бойправ В.П. Аналитический метод определения пористости горных пород с использованием гранулярных моделей // Межвед. сб. науч. тр. «Геотехническая механика». – Днепропетровск, 2006. – Вып. №65. – С.17-27.
10. Бабков В.Ф., Безрук В.М. Основы грунтоведения и механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1986. – 239 с.
11. Чаповский Е.Г. Инженерная геология (Основы инженерно-геологического изучения горных пород). Учебное пособие для студентов геолог. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1975. – 296 с.
12. Гольдберг В.М., Скворцов Н.П. Проницаемость и фильтрация в глинах. М.: Недра, 1986. – 160 с.
13. Геологія з основами мінералогії/ Під ред. Д.Г.Тихоненка. – К.: Вища освіта, 2003. – 287 с.