

УГОЛ ТРЕНИЯ ПРОДУКТОВ МАРГАНЦЕВЫХ РУД И ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ

Эксплуатация и развитие горнорудной промышленности нашей страны связано с эксплуатацией мощных горно-обогатительных комбинатов, возводимых на базе месторождений бедных руд с последующим их обогащением. Технология обогащения предусматривает добычу, транспортирование, складирование, дробление и перегрузку их в различных вариантах.

Одной из важнейших характеристик сыпучих и скальных материалов является **трение**, которое может быть как **внутренним**, так и **внешним**, обусловленным трением сыпучего материала об ограждающие поверхности (металл, бетон, резина, горная порода и другие).

При транспортировке, хранении и перегрузке измельченных материалов в бункерах, силосах, думпкарах, вагонетках, самосвалах и других аккумулирующих емкостях под воздействием его массы и вибраций возникают силы сжатия и трения, как в самом материале, так и на стенках емкостей. При этом эти силы создают механическое напряжение в стенках емкостей, а с другой стороны они способствуют, если материал мелкозернистый, сыпучий и обладает когезионной способностью приводить к ухудшению регулярной разгрузки емкостей в результате образования «сводов, каналов, завесаний и налипаний». Поэтому, при конструировании емкостей и других устройств следует учитывать следующее:

1. должен быть произведен расчет прочности и устойчивости стенок емкости;
2. конструкция емкости (устройства) должна соответствовать его прямому назначению, особенно выпускных устройств.

Тер Борг из полученных данных по испытаниям пришел к заключению, что при рабочем угле трения 40° заданная величина разгрузки из бункера в основном определяется углом трения по стенке [1]. В литературе рассматривают данные по углам трения рабочего или угла внутреннего трения, тогда как сведения (данных измерений) по не менее важному вопросу, связанному с углом трения по различным поверхностям (материалам) почти отсутствуют.

Однако Дж.Дау проводил сравнительные измерения углов трения шести типов сыпучих материалов по одиннадцати образцам стенок [2]. Всесторонний анализ результатов проведенных испытаний показал, что для большинства комбинаций эффект трения по образцу поверхности (футеровки) стенки проявляется в рамках перехода трения твердое-твердое в трение твердое-образец стенки.

Практика работы с марганцевыми и железорудными концентратами показала, что для их доставки, погрузки, разгрузки, складирования и хранения приходится применять различные конструктивные приспособления: тетки, лотки, транспортирующие машины, перегрузочные установки, силосы, бункера и т.д. Для инженерных расчетов этих машин и устройств необходимо знать физико-механические свойства перерабатываемых материалов, одним из которых является угол трения по различным поверхностям. Для этих целей необходимы данные по углам внешнего трения (скольжения).

Отношение силы трения скольжения к величине нагрузки, нормальной к поверхности трения, называют коэффициентом трения. Сыпучие материалы характеризуются углом трения **-f**.

При проектировании конвейеров, желобов и других устройств для технологической перегрузки сыпучих материалов приходится пользоваться данными о трении материала по различным поверхностям (металл, бетон, резина, полистирол, дерево и др.).

Под внутренним трением твердого тела понимают сопротивление, возникающее при относительном перемещении отдельных частей тела при его деформировании. Углы внутреннего трения и сцепления горных пород и руд играют большую роль при изучении оползневых явлений, устойчивости горных разработок, устойчивости бортов карьеров и т.д. Различают два вида характеристик трения горных пород: в монолитном состоянии и в сыпучем. Поведение монолитной горной породы в процессе трения характеризуется коэффициентом трения, а сыпучей горной массы – углом трения (внешним и внутренним). Сдвиговые характеристики сырья

необходимы для определения геометрических параметров бункеров и силосов по условиям надежного испытания сыпучего материала (углов наклона стенок, конвейеров, желобов, размеров выпускных отверстий и др.).

Отношение силы трения скольжения к величине нагрузки нормальной к поверхности трения, называют коэффициентом трения (М):

$$M = \frac{R}{P}$$

Так как коэффициент трения является коэффициентом пропорциональности между силой трения (R) и нормальной нагрузкой (P) выражение ($R = MP$) называют законом Амонтона. Выделяют коэффициент трения покоя и движения (соответственно).

Частицы сыпучего материала при сдвиге преодолевают трение покоя не одновременно, следовательно, величина коэффициента внутреннего трения в этом случае будет промежуточной между значениями коэффициента внутреннего трения покоя и движения и принимается равной коэффициенту внутреннего трения, соответствующему началу движения (T_0).

Зернистые частицы контактируют между собой различным способом: грань с гранью, грань с плоскостью и двумя плоскостями. Если в первом случае взаимодействуют поверхности с одноименными положительными зарядами, во втором – с разноименными, то в третьем – с одноименными отрицательными. От характера взаимодействия частиц, преобладания способа взаимодействия зависит формирование скелета текстуры материала, а, следовательно, и сила сцепления.

Под воздействием нагрузок происходит, на наш взгляд, более плотное параллельное переуплотнение зернистых частиц, если исходная структура материала была неупорядоченной. От этого зависит порозность скелета и прочность связей между частицами [3, 4, 5, 6].

Величина силы трения зависит от многих факторов, основными из которых следует считать физико-химическую природу взаимодействующих тел, минералогический состав, грансостав, форма зерен, степень окатанности, шероховатость поверхности, удельной поверхности и в значительной степени способа контакта частиц между собой.

Коэффициент внутреннего трения характеризует трение между частицами минерального сырья. Возрастает с увеличением его плотности размера самих частиц и уменьшением с увеличением степени их окатанности. Трение в сыпучем сырье явление сложное и его величина зависит от многих факторов, истинной и насыпной плотности, минерального и гранулометрического состава, структуры и текстуры, размеров, формы его зерен, внешних нагрузок, влажности, сил сцепления частиц. Величину внутреннего трения обычно выражают через угол внутреннего трения и сцепления.

Под сопротивлением сдвигу понимают способность сырья сопротивляться смещению одной его части относительно другой под действием сил трения и сцепления. Сцепление (сопротивление первоначального сдвига) обуславливает такие явления, как сползание горной массы, сводообразование и зависание сырья в бункерах и силосах, образование вертикальной стенки и понимается как **слеживаемость** сырья [13]. С преодолением сил связано не только движение сырья при разгрузке емкости, но и сопротивление при зачерпывании его перегрузочными машинами.

Методика определения сдвиговых характеристик (угла внутреннего трения и сцепления) минерального сырья сводится к тому, что проводят испытания сырья на сдвиг (срез) и измеряют сдвиговое усилие. Зная нормальную нагрузку и площадь среза, вычисляют величины нормальных (P, кГ/см²) и касательных напряжений (T, кГ/см²).

Определяют сдвиговые напряжения при нескольких значениях нормальной нагрузки и вычисляют нормальное и касательное напряжение, по которым строят график зависимости $T = f(P)$ (рис. 1). Это должна быть прямая линия. Угол наклона этой прямой α равен углу внутреннего трения, а отрезок $\tau_0(C)$, отсекаемый этой прямой на оси ОУ определяет величину сцепления между частицами сырья.

Существует несколько типов приборов для определения сдвиговых характеристик сыпучей горной массы, но принципиального различия в них нет.

На определенное количество сыпучей массы ставится рамка без дна с той же сыпучей массой. К ней прикладывается нормальная нагрузка P и постепенно добавляется сдвиговое усилие

до тех пор пока рамка не придет в движение. По описанной методике были исследованы сдвиговые характеристики продуктов обогащения марганцевых руд в зависимости от влажности и крупности. Эти исследования были выполнены ранее [3]. Результаты проведенных исследований приведены в табл. 1.

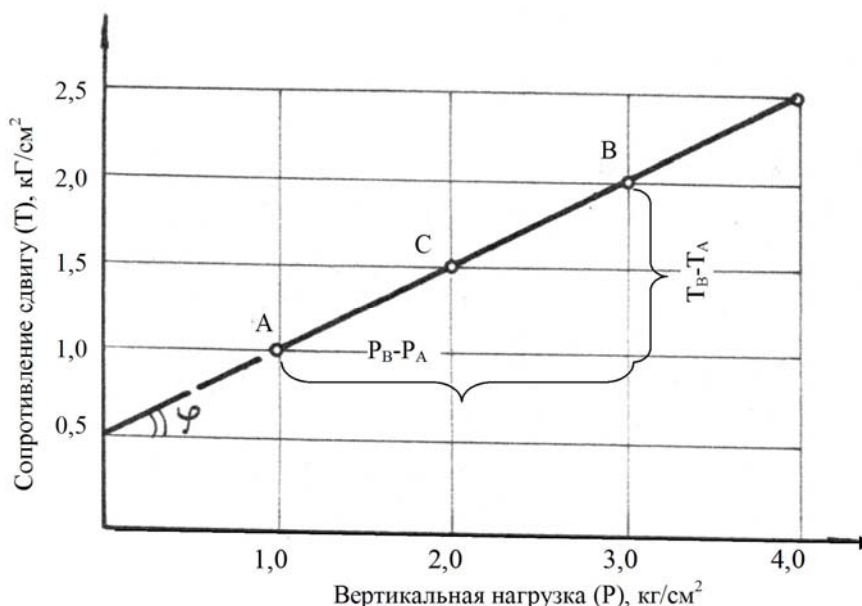


Рис.1 - Зависимость сопротивления сдвига от вертикальной нагрузки

Таблица 1

Сдвиговые характеристик продуктов обогащения марганцевых руд

Наименование продуктов	Индекс	Сдвиговые характеристики											
		Коэффициент внутреннего трения (tgφ)				Угол трения (φ), град.				Сцепление (C), кг/см ²			
		Влажность(W), %											
		в/с	10	15	20	в/с	10	15	20	в/с	10	15	20
1. Питание магнитной сепарации	ПМ-1	0,93	0,81	0,818	0,816	42°49'	39°	38°56'	39°12'	0,05	0,10	0,04	0,08
	ПМ-2	0,89	0,807	0,787	0,767	41°36'	38°54'	38°12'	37°29'	0,10	0,07	0,04	0,05
2. Концентрат I роликов	КР-1	0,93	0,81	0,664	0,84	42°49'	39°	33°35'	40°2'	0,02	0,03	0,25	0,04
	КР-2	0,89	0,78	0,74	0,75	41°36'	37°54'	36°30'	36°54'	0,15	0,13	0,12	0,1
3. Пески классификации шламов промывки	ПШ-1	0,75	0,67	0,60	0,576	36°52'	33°50'	30°58'	29°57'	0,01	0,02	0,12	0,12
	ПШ-2	0,75	0,72	0,71	0,69	36°52'	35°45'	35°22'	34°36'	0,02	0,04	0,02	0,01
4. Пески обесшламливания шламов промывки	ПС-1	0,77	0,66	0,60	0,568	37°36'	33°45'	30°58'	29°36'	0,06	0,08	0,04	0,20
	ПС-2	0,78	0,77	0,75	0,68	37°57'	37°36'	36°52'	34°13'	0,04	0,04	0,03	0,06
5. Хвосты флотации	ХФ-1	0,738	0,63	0,63	0,66	36°26'	32°12'	32°19'	33°26'	0,03	0,12	0,11	0,03
	ХФ-2	0,77	0,66	0,65	0,69	36°36'	33°45'	31°18'	34°36'	0,03	0,07	0,03	0,03
6. Концентрат флотации	КФ-1	0,79	0,72	0,708	0,65	38°19'	35°45'	35°18'	31°18'	0,09	0,04	0,04	0,06
	КФ-2	0,78	0,76	0,702	0,69	37°57'	37°12'	35°	34°36'	0,03	0,02	0,02	0,01
7. Хвосты магнитной сепарации	ХМ-2	0,79	0,73	0,70	0,70	38°19'	36°6'	35°	35°	0,1	0,05	0,05	0,04

Из таблицы следует, что коэффициент внутреннего трения всех продуктов при увеличении влажности от воздушно-сухого состояния до 20% имеет тенденцию к снижению за счет роста толщины пленочной воды, которая увеличивает расстояние между частицами и тем самым уменьшает силы молекулярного притяжения и зацепления частиц.

Коэффициенты внутреннего трения проб с большим содержанием мелких классов в воздушно-сухом состоянии (ПШ, ПС, ХФ, КФ) мало отличаются друг от друга.

Коэффициенты внутреннего трения проб с большим содержанием крупных классов (КР-2, ПМ-2) имеют сравнительно большие значения коэффициентов внутреннего трения, в основном, за счет образования в таких пробах структурного каркаса из крупных частиц, который принимает на себя, главным образом, все сдвиговые усилия.

Сцепление между частицами исследуемых проб в воздушно-сухом состоянии очень незначительное и оно, в большинстве случаев, растет с увеличением влажности. На наш взгляд,

это объясняется образованием водно-коллоидных оболочек вокруг частиц, обладающих склеивающей способностью.

Для продуктов обогащения марганцевых руд установлен наибольший угол внутреннего трения для концентрата 1 роликов $42^{\circ}49'$ и минимальный – для песков обесшламливания сливов шламов промывки $29^{\circ}36'$ (табл. 1). Для определения углов внешнего трения исследуемых продуктов нами был использован простейший прибор – трибометр, с меняющейся футеровкой. Коэффициенты и соответствующие им углы внешнего трения в зависимости от влажности и крупности материала исследуемых продуктов и типа футеровки приведены в табл. 2 [3].

Таблица 2

Характеристики трения продуктов обогащения марганцевых руд

Наименование продукта	Индекс	Коэффициент внешнего трения ($\tan\alpha$) по											
		металлу				резине				бетону			
		влажность(W), %											
в/с	10	15	20	в/с	10	15	20	в/с	10	15	20		
1. Питание магнитной сепарации	ПМ-1	0,518	0,883	0,842	0,769	0,529	0,798	0,782	0,713	0,693	0,862	0,961	0,891
	ПМ-2	0,515	0,764	0,844	0,802	0,521	0,771	0,880	0,968	0,631	0,901	0,970	1,017
2. Концентрат I роликов	КР-1	0,532	0,993	0,929	0,741	0,538	0,845	0,919	0,723	0,699	0,929	1,063	0,871
	КР-2	0,537	0,700	0,775	0,809	0,526	0,724	0,780	0,818	0,638	0,772	0,895	1,003
3. Пески классификации шламов промывки	ПШ-1	0,558	0,717	0,698	0,708	0,575	0,708	0,719	0,739	0,728	0,861	0,836	0,964
	ПШ-2	0,566	0,739	0,860	0,922	0,558	0,754	0,838	0,873	0,727	0,848	0,971	0,962
4. Пески обесшламливания шламов промывки	ПС-1	0,566	0,835	0,773	0,719	0,577	0,744	0,727	0,747	0,700	0,864	0,900	0,937
	ПС-2	0,515	0,700	0,804	0,895	0,523	0,716	0,784	0,856	0,695	0,780	0,845	0,959
5. Хвосты флотации	ХФ-1	0,570	0,772	0,847	0,844	0,646	0,760	0,765	0,926	0,758	0,843	0,828	0,849
	ХФ-2	0,562	0,744	0,827	0,957	0,592	0,771	0,811	0,885	0,723	0,973	0,984	1,072
6. Концентрат флотации	КФ-1	0,571	0,838	0,866	0,772	0,747	0,758	0,779	0,751	0,724	0,865	0,849	0,862
	КФ-2	0,567	0,814	0,864	0,883	0,574	0,794	0,847	0,890	0,703	0,839	0,880	1,080
7. Хвосты магнитной сепарации	ХМ-2	0,502	0,808	0,798	1,0013	0,508	0,813	0,789	1,032	0,671	0,884	1,064	1,7

Из анализа этих данных следует, что характеристики внешнего трения слабо зависят от крупности материалов в исследуемом интервале (-5 + 0 мм).

Значения коэффициентов трения для всех значений влажности и крупности продуктов по металлу и резине отличаются друг от друга на небольшую величину.

В воздушно-сухом состоянии все пробы имеют самый малый угол внешнего трения.

С увеличением влажности от 0 до 15% углы внешнего трения проб возрастают, так как возрастает сцепление между частицами (табл. 2). Особенно относительно большой рост углов внешнего трения наблюдается в интервале – 10%. В интервале влажности 15-20% угол внешнего трения имеет тенденцию к снижению за счет уменьшения сцепления между частицами с одной стороны и частицами футеровкой с другой. Эта тенденция в ряде случаев нарушается, особенно для проб с индексом 2. Причина этого нами не установлена.

Большой угол внешнего трения (около 60°) по бетону при влажности 20% имеет проба хвостов магнитной сепарации ХМ-2. Эта проба содержит 80% кварца и незначительное количество рудных минералов с массовой долей марганца 3,0%.

Наличие большой свободной поверхностной энергии частиц пробы обуславливает сильное молекулярное взаимодействие их между собой, водой и бетонной футеровкой.

В лаборатории были проведены эксперименты по выяснению влияния влажности на величину угла внешнего трения кварцевого песка и массовой доли кварца на величину угла внешнего трения искусственных смесей пробы КР-2 и кварцевого песка при влажности 20% о бетонную футеровку.

Результаты экспериментов представлены на рис. 2. Угол внешнего трения кварцевого песка (кривая 1) резко возрастает с увеличением влажности. Следует отметить, что уже при 15% влажности он равен около 52° , а при 20% проба не осыпалась (не двигалась) по футеровке, а прилипла.

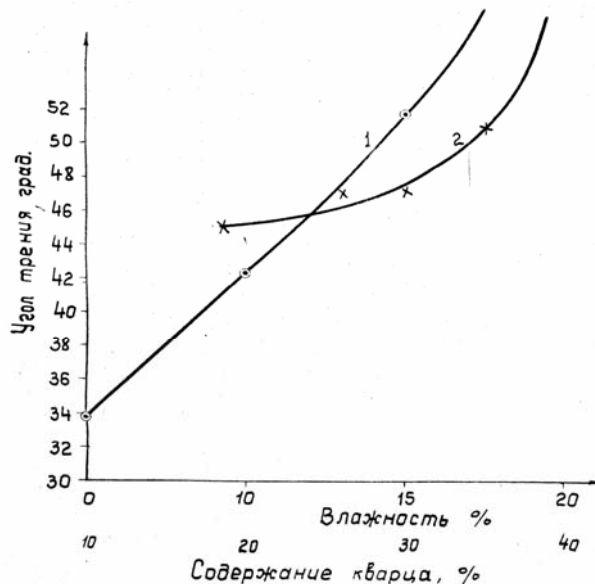


Рис. 2 – Зависимость угла внешнего трения по бетону:
1 – от влажности; 2 – от массовой доли кварца

В искусственных смесях пробы КР-2 и песка угол внешнего трения возрастает с увеличением массовой доли песка (кривая 2) и уже при содержании песка 40% проба не ссыпалась с основания футеровки. Вопрос о влиянии кварца на физико-механические свойства сыпучих материалов требует постановки специальных исследований.

В отличие от марганцеворудного сырья для железорудных концентратов определяли угол трения по материалу пробы концентратов Ингулецкого ГОКа, для которых наибольший угол характерен для концентратов РОФ-1 - 65-70°, а наименьший - 30° при влажности 8-10% всех исследованных нами концентратов (табл. 3).

Таблица 3

Результаты определения угла трения по различным материалам

Предприятие ИнГОК	Массовая доля влаги W, %	Угол внешнего трения (град.) по			
		резине	стали	полистиролу	бетону
РОФ-1	сухой	40-42	32-34	33-35	45-46
	6	31-33	30-32	30-32	38-39
	8	33-35	32-34	30-33	36-38
	10	33-35	30-33	30-33	30-34
	12	60-65	60-65	65-70	56-58
РОФ-2	сухой	40-41	32-34	30-33	44-46
	6	32-34	30-33	32-34	36-39
	8	33-35	33-35	30-34	36-38
	10	32-34	32-34	33-35	35-37
	12	34-36	30-33	34-35	36-38
РОФ-3	сухой	40-41	32-34	30-33	45-47
	6	32-34	30-33	30-33	36-39
	8	35-36	34-36	30-33	40-42
	10	34-35	34-37	30-33	36-38
	12	36-38	48-50	39-41	40-44

Такое поведение концентратов при возрастании влажности можно объяснить образованием комочков, которые вначале увеличиваются с ростом доли влаги до определенной величины. Как это было установлено нами при изучении изменения насыпной плотности концентратов ИнГОКа при изменении их влажности. Затем наблюдали объединение отдельных комочков в один общий. Это приводит к постоянному или резкому возрастанию угла трения, как например, для концентрата РОФ-1. Вначале в воздушно-сухом состоянии мы наблюдали угол трения 40-42°, затем резкое падение до 31-35° при влажности 10% и резкое возрастание до 60-65° при влажности

12%. Поведение насыпной плотности концентратов при изменении влажности от 0 до 12% наблюдали подобным образом – вначале уменьшение, затем перегиб и снова ее возрастание.

Изучение водно-физических свойств и удельной поверхности концентратов (табл. 4) позволяет сделать заключение, что по формам консистенции можно выделить: текучую форму консистенции, которая наступает при массовой доле влаги 13,1-15,1%, твердая – при 7,15-11,34%. Между этими значениями массовой доли влаги концентраты находятся в пластичной консистенции.

Таблица 4
Водно-физические свойства концентратов Ингулецкого ГОКа (консистенция)

Водно-физические свойства	РОФ-1	РОФ-2	РОФ-3
Нижний предел пластичности (W_n), %	8,54	10,97	9,38
Верхний предел текучести (W_p), %	13,50	15,20	14,90
Число пластичности (W_r), %	6,35	4,42	5,30
Удельная поверхность (S_v), м ² /кг	204,5	244,1	230,9
ММВ (W), %	9,48-9,68	11,08-11,18	11,1-10,87

По величине удельной поверхности и водно-физическим свойствам концентраты следует поставить в следующий ряд: РОФ-1, РОФ-3, РОФ-2.

Поведение монолитной горной породы в процессе трения характеризуется коэффициентом внутреннего трения (tgf) и сцепления (C). Углы внутреннего трения и сцепления горных пород и руд играют большую роль при изучении оползневых явлений, устойчивости горных выработок и бортов карьеров. Исследования по их определению выполняли в лабораторных условиях в специальных матрицах, а образцы неправильной формы размещали в цементные блоки прямоугольной формы для придания им направления сдвига (табл. 5). Размер образцов для испытаний $5 \times 5 \times 5$ см, а цементных блоков – $10 \times 10 \times 15$ см. Испытания образцов выполняли строго перпендикулярно слоистости по отношению к усилию среза. Тангенс угла внутреннего трения вычисляли по формуле:

$$tgf = (q_1 \sin \alpha_1 - q_2 \sin \alpha_2) / (q_1 \cos \alpha_1 - q_2 \cos \alpha_2).$$

Сцепление вычисляли по формуле:

$$C = \frac{q_1 q_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1)}{q_1 \cos \alpha_1 - q_2 \cos \alpha_2},$$

где $q = \frac{P}{F}$ – отношение разрушающей силы к площади поперечного сечения в плоскости среза;

α_1, α_2 – углы при которых выполняли сдвиг.

В табл. 6 размещены результаты проведенных исследований по разновидностям железистых кварцитов и пород.

Увеличение влажности продуктов от воздушно-сухого состояния до 10% вследствие образования комков угол внутреннего трения увеличивается, так как увеличивается и насыпная плотность, как было установлено ранее [3, 11].

Таблица 6

Угол внутреннего трения и сцепления материалов железистых кварцитов

Наименование проб	Месторождение	Угол внутреннего трения, ϕ град.	$\operatorname{tg}\phi$, д.ед.	Сцепление (C), кГ/см^2
Мартитовая руда крепкая	ш.им.Коминтерна	37	0,754	82
Мартитовый кварцит	ш.им.Дзержинского	42	0,900	51
Магнетит-мартитовый кварцит	ЮГОК	46	1,035	392
Окисленная руда	КГОКОР	15	0,270	160
Магнетитовый концент.	ЮГОК	13	0,225	175
Аспидно-хлоритовые сланцы	ш.им.Дзержинского	18	0,325	210
Красковые сланцы	ш.им.Коминтерна	17	0,306	56
Филлиты	ш.им.Коминтерна	23	0,424	229
Лимонит светлый	Кремиковское м-е	35	0,708	38
Концентрат карбонатный	Алексеевская ОФ	36	0,710	240
Известняк	ПГОК	14	0,275	122
Голубая пыль, концентрат	Индия	16	0,279	133

При увеличении влажности от 10 до 20% происходит понижение значений углов внутреннего трения вследствие увеличения насыпной плотности, разрушаются комочки и материал переходит в пластичное состояние.

Коэффициент внутреннего трения проб с большим содержанием мелких классов (ПШ, ПС, КФ, ХФ) мало отличаются друг от друга, а коэффициент трения более крупных классов (КР и ПМ) имеют меньшую удельную поверхность и сравнительно больший угол внутреннего трения за счет образования структур каркаса из более крупных частиц.

При увеличении влажности материалов коэффициент внутреннего трения уменьшается, а сцепление растет.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ter Borg. Erfahrungen aus Scherversuchen mit Schuttgutern der Chemle. CIT.-1981.- № 53, S.662-663.
2. Дж.Дау. Определение угла трения сыпучих материалов по образцам стенок из различных материалов. Перевод с англ., Механобрчермет 15/84 ЦООНТИ/ВНО.- Кривой Рог, 1985.
3. Испытание физико-механических свойств сырой марганцевой руды, промпродуктов обогащения и концентратов: Отчет / Рук.работы Санжаровский П.А., Доценко В.Д. - Кривой Рог, Механобрчермет, 1973.
4. Маслов Н.П., Котов М.Ф. Инженерная геология. – М. : Изд. литературы по строительству, 1971.
5. Барон Л.И., Логунов Б.И., Позин Е.З. Определение свойств горных пород (справочное пособие). - М. , 1962.
6. Приклонский В.А. Грунтоведение, ч.11.- М: Госгеоллиздат. 1952.
7. Барон Л.И. Характеристика трения горных пород. - М. : Наука, 1967.

8. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов.-2-е изд. перераб.-М.: Стройиздат, 1971.- 368 с.
9. Литвинов И.М. Исследование грунтов в полевых условиях.- М.: Углетехиздат, 1954.
10. Васильев А.М. Основы современной методики и техники лабораторных определений физических свойств грунтов.- М.: Изд. лит. по строительству и архитектуре, 1953.
11. Доценко В.Д. Разработка методики оценки водоотдачи и изменения пластичности железорудных концентратов при транспортировке: Отчет о НИР - Кривой Рог, Механобрчермет, 1985.
12. Доценко В.Д.,Радчук А.Г. Слеживаемость измельченных материалов.//Новое в технологии и технике переработки минерального сырья: Сб. науч. трудов.- Кривой Рог, Механобрчермет, 2012.
13. Исследование физико-механических свойств и характеристик пылевидных и химических грузов (необходимых для разработки технических средств перевозки, перегрузки и хранения): Отчет.- Ленинград, 1965.