

СЛЕЖИВАЕМОСТЬ ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Под слеживаемостью принято понимать свойство некоторых измельченных порошкообразных материалов терять сыпучесть при длительном хранении. Потеря сыпучести измельченных материалов по существу определяет увеличение его связности, т.е. слеживаемость это проявление закономерностей увеличения сил сцепления между частицами сыпучей среды в зависимости от ее напряженного состояния и внешних условий. Анализ процессов, происходящих в насыпном материале при его хранении и перевозке, позволяет выделить два типа связности, а, следовательно, и слеживаемости: физико-механическую и физико-химическую. Связность первого типа обуславливается физико-механическими процессами, протекающими при взаимодействии частиц измельченных материалов. В таких случаях на практике всегда возможно установить место контакта и границы контактирующих поверхностей частиц, представляющих измельченный материал. Когда частицы приходят в подвижное состояние, для их разрыва необходимо преодолеть поверхностные силы сцепления, возникновение которых связано с присутствием упругого молекулярного и электростатического взаимодействия. Существенное влияние на связность первого типа оказывают капиллярные силы сцепления и прилипания частиц. Следует отметить, что этим видом связности, по нашим наблюдениям обладают: цемент (в нормальных условиях), апатитовый концентрат, флотационный серный колчедан, бентонит, известняк и некоторые другие измельченные материалы.

Связность второго типа вызывается физико-химическими процессами, которые обычно приводят к прочному сцеплению частиц. Такую связность могут иметь поваренная и калийная соль, сахар, в меньшей степени цемент и другие подобные порошковые материалы.

Вид и прочность связности в значительной степени обусловлены химико-минералогическим составом и физическими особенностями зернистого материала. Влажность в зернистом материале оказывает существенное влияние на связность и его прочность. Обычно, совершенно сухие материалы слеживаются слабо, хотя при нормальной или повышенной влажности они могут сильно слеживаться (упрочняться). Следует отметить, что при этом существенное влияние оказывает высота насыпанного сыпучего материала. Порозность его при этом значительно уменьшается. При связности первого типа эти силы выражают в виде зависимости функции расстояния между частицами $P=f(h)$, где P – равнодействующая сил, которые возникают при взаимодействии частиц в дисперсной среде, h – расстояние между частицами.

Вид приведенной функциональной зависимости пока нельзя получить аналитическим путем, так как при этом кроме минерального состава следует учесть все многообразие физических факторов, которые проявляются вблизи взаимодействующих поверхностей частиц.

Нерпин С.В. и Дерягин Б.В. показали, что функция $P=f(h)$ будет иметь вид непрерывной кривой линии. Характерные обобщенные графики для разных материалов изображены на рис. 1 [1].

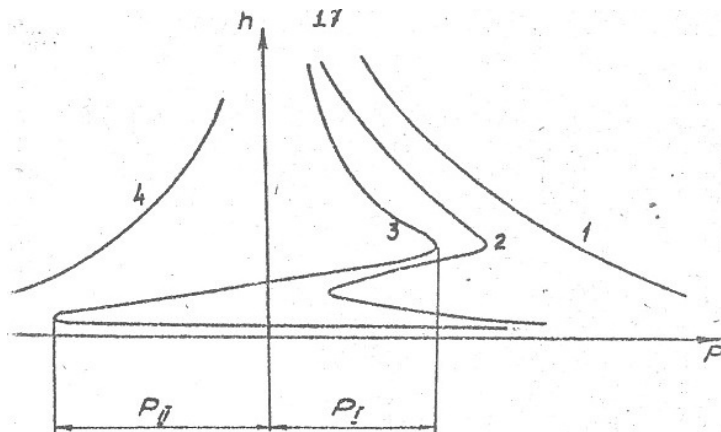


Рис. 1 – Зависимость сил взаимодействия частиц насыпного груза от расстояния между ними

Измельченные материалы, частицы которых взаимодействуют по закону, описываемому кривой 1 или 2, не слеживаются, потому что на любом расстоянии между частицами (h) действуют силы отталкивания (положительные значения P). Следовательно, при любом напряженном состоянии такого измельченного материала, его частицы стремятся оттолкнуться друг от друга. Таким образом, даже при длительном времени хранения такой материал не приобретает связности, т.е. он не слеживается (например, сухой песок).

И наоборот, дисперсные материалы, которые подчиняются кривой 4, практически постоянно слеживаются, т.к. между частицами такого материала действуют силы притяжения. Чем больше внешняя нагрузка, тем меньше расстояние между ними (h) и тем больше силы сцепления. Такой материал постоянно обладает связностью (например, флотационный колчедан при влажности около 8%). Промежуточное положение характерно зернистым материалам, частицы которых описываются кривой 3.

Слеживаемость такого зернистого материала находится во взаимодействии с действующими напряжениями. Когда они не превышают величины преодолевающей потенциальный барьер P_I , то зернистый материал не слеживается. Если внешние нагрузки велики и частицы проходят потенциальный барьер P_I , в таком случае материал приобретает связность (слеживается), потому что для получения относительного перемещения частиц следует преодолеть потенциальный барьер их притяжения P_{II} . В таком случае зернистый материал приобрел связность, т.е. он слежался.

Слеживаемость сыпучих зернистых материалов существенно зависит от характера нарастания деформаций с течением времени при увеличении нормальных или касательных напряжений.

Объемная деформация ΔV дисперсного материала является статистическим результатом уменьшения расстояния между частицами при возрастании внешней нагрузки ($\Delta V \sim \sum \Delta h$) и длится после момента ее приложения, например, после заполнения бункера, силоса, склада или вагона, деформация сыпучего материала может продолжаться значительное время.

Зависимость объемной деформации от времени t можно представить в общем виде плавной кривой (рис. 2), которая асимптотически приближается к своему предельному значению.

Для частиц зернистого материала, взаимодействующих по закономерности 4 (рис. 1), это приводит к повышению связности материала и сыпучий материал слеживается. Если взаимодействие частиц сыпучего материала описывается кривой 3 (рис. 1), то в случае сближения частиц сыпучего материала при нарастании деформации через критическое значение h , соответствующего потенциальному барьеру P_I , дисперсная среда становится связной, что будет указывать на то, что она слеживается.

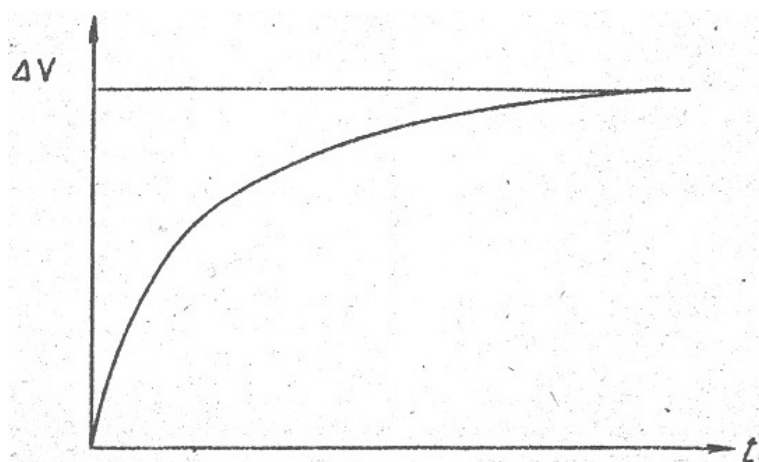


Рис. 2 – Изменение объемной деформации сыпучего груза во времени при постоянной внешней нагрузке

Большие динамические усилия могут сильно уплотнить сыпучий материал, и он может быстрее приобрести связность, таким образом, быстрее слежаться. Так происходит при транспортировке влажного апатитового концентрата в железнодорожных вагонах. Нарастание сил деформации может происходить из-за случайных ударов или вибрации, которые присущи любому производству. Такие толчки способствуют дополнительному уплотнению сыпучего материала, что

и способствует повышению его связности. Чем дольше хранится материал, тем больше он подвергается случайным вибрациям и тем сильнее слеживается.

Известное влияние на повышение связности сыпучего материала, при его хранении оказывает движение влаги в неподвижном слое за счет сил тяжести, теплообмена, испарения, капиллярных сил и пр.

Слеживаемость второго типа обусловлена другими процессами. Этим видом слеживаемости, как известно, характеризуются сыпучие материалы, частицы которых или их компоненты легко растворяются в водной среде. К примеру, такие зернистые материалы, как сахар, поваренная и калийная соль, цемент, известняк и др. при наличии влаги могут быстро слеживаться до монолита, в то время как при отсутствии влаги они сохраняют свое сыпучее состояние длительное время.

Если принять рассмотренные ранее положения за основу, то можно определить слеживаемость (сопротивление разрушению), как увеличение с течением времени связности зернистых материалов при его хранении в неподвижном объеме.

В результате долгого хранения влажного сыпучего материала, вследствие растворимости частиц материала происходят сложные физико-химические процессы, которые приводят к образованию осадка в местах контактов, а также на поверхности частиц. Осадок образует прочную кристаллическую решетку, соединяя частицы между собой.

Увеличение влажности воздуха окружающей среды может увеличить эффект прочного соединения частиц материала, обладающего хорошей гигроскопичностью. Порозность насыпного материала постепенно уменьшается за счет привноса и отложения раствором осадка, превращая сыпучий слеживающийся материал в монолит.

Степень слеживаемости оценивается величиной угла внутреннего трения (ϕ) сыпучего материала (горной породы) в рыхлом состоянии и сопротивлением первоначальному сдвигу (сцеплением (C), кГ/см^2).

Для каждой исследуемой точки следует испытать по 3 параллельных образца сыпучего материала при различных вертикальных нагрузках (P) (например 1, 2, 3 кГ/см^2).

На основании проведенных испытаний деформаций сдвига производят вычисление основных параметров: угла внутреннего трения (ϕ) и сцепления (C). Данные таких испытаний представляют в виде графика зависимости между нагрузкой и сопротивлением сдвигу.

На рис. 3 приведен такой график, где на горизонтальной оси откладывается вертикальная нагрузка (P), а на вертикальной – соответствующие величины сдвигающих усилий (T). Прямая, проведенная через точки, соответствующие результатам параллельно испытанных проб материала, представляет собой линию сдвигающих напряжений. Угол наклона этой прямой к горизонтальной оси является углом внутреннего трения (ϕ). Величина тангенса угла ($\text{tg}\phi$) – коэффициент внутреннего трения, а отрезок, отсекаемый прямой сдвига на вертикальной оси графика – величину сцепления (C).

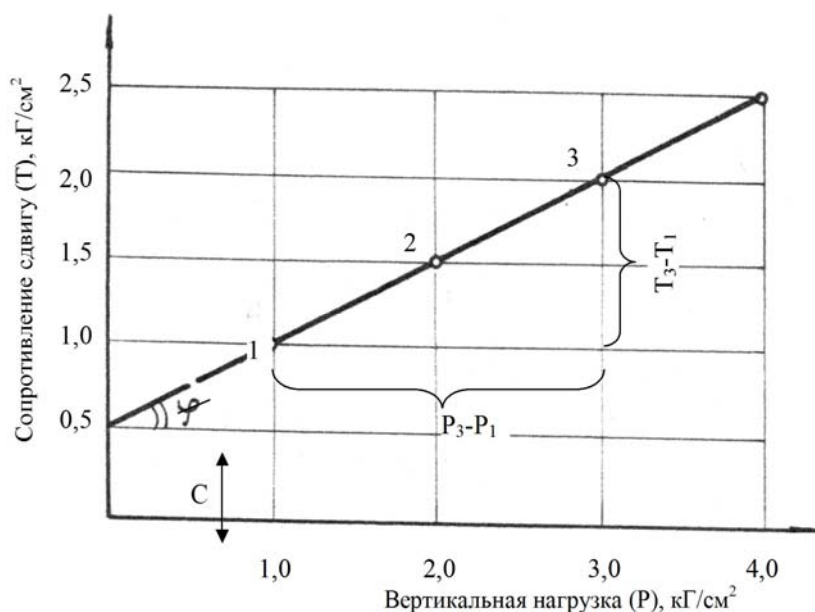


Рис. 3- Зависимость сопротивления сдвига от вертикальной нагрузки

Вычисляют эти характеристики по формулам:

а) коэффициент внутреннего трения –

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{T_3 - T_1}{P_3 - P_1}$$

б) величину сцепления –

$$C = T_1 - P_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

Компрессионные сдвиговые характеристики сыпучих материалов и песчаных грунтов определяют односрезным прибором ГПП-30 (рис. 4), который состоит из следующих основных узлов: загрузочного устройства 1, обеспечивающего передачу вертикального давления на образец; рабочего столика 2; срезывателя 3; тормоза 4; механизма для передачи на образец горизонтального сдвигающего усилия 5 с гирей 6. Прибор монтируется на стальной станине 7, на которую устанавливают металлическую панель. Горизонтальная установка прибора производится с помощью винтов. Верхняя обойма срезывателя – подвижная, а нижняя – неподвижная. Испытание проб на сдвиг осуществляется методом приложения независимой уплотняющей и сдвигающей силы. Величина навески для анализа $2 \times 10^{-4} \text{ м}^3$. Время проведения испытания в зависимости от крупности пробы от 6 часов до 2-х суток.

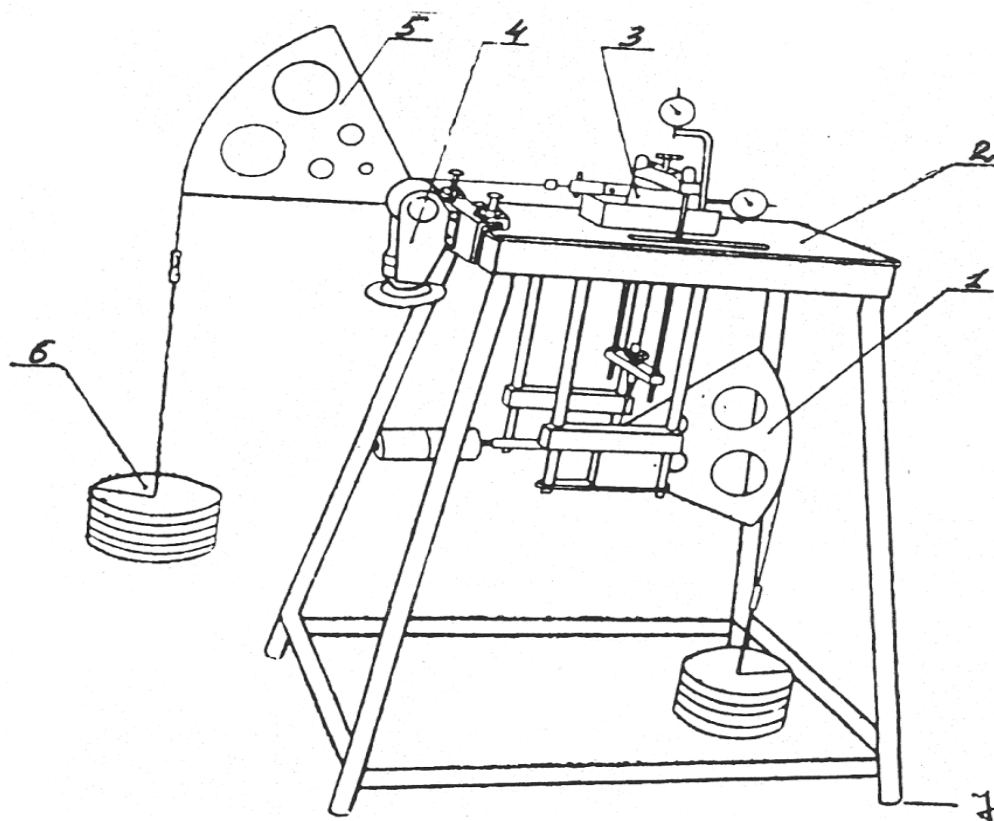


Рис. 4 – Прибор ГПП-30

Испытанию подвергались продукты обогащения марганцевых руд в зависимости от их влажности. Результаты проведенных исследований приведены в табл. 1.

Из таблицы видно, что коэффициент внутреннего трения ($\operatorname{tg} \varphi$) всех испытанных проб при увеличении влажности от воздушно-сухого состояния до 20% имеет тенденцию к снижению, которое происходит за счет роста толщины пленочной влаги вокруг частиц, увеличивая расстояние между частицами и тем самым, уменьшая силы молекулярного взаимодействия и зацепление частиц.

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

Таблица 1

Сдвиговые характеристики 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

Коэффициент внутреннего трения проб с большим содержанием крупных классов (КР-2, ПМ-2) имеет сравнительно большие значения коэффициента внутреннего трения, главным образом, за счет образования в таких пробах структурного каркаса из крупных частиц, который принимает на себя, главным образом, всю сдвиговую нагрузку.

Сцепление между частицами исследуемых проб в воздушно-сухом состоянии очень незначительное и оно в большинстве случаев, растет с увеличением влажности. Вероятно, это объясняется образованием вокруг частиц водно-коллоидных оболочек, обладающих склеивающей способностью.

Способы преодоления связности обусловлены ее видом.

Для связности первого типа, когда силы сцепления между частицами сыпучего материала сравнительно невелики используют:

1. механическое рыхление,
2. применение фильтрационного потока жидкости или газа,
3. ослабление сил сцепления путем добавления специальных присадок.

На практике для борьбы со слеживаемостью применяют главным образом первый и второй способ преодоления связности. Давно известны механические способы разрыхления слежавшихся материалов. Это, прежде всего различного рода шуровщики, шнековые и цепные рыхлители и т.п. В последнее время получили распространение системы механического воздействия на слежавшийся материал при помощи пульсирующих пневмодиафрагм и надувных оболочек.

Второй способ основан на использовании фильтрационных сил, которые при определенных условиях приводят связной материал к идеально сыпучей среде. На этом принципе работает большинство пневматических систем рыхления в силосах и бункерах.

Последний способ довольно редко применяется, т.к. требует детального изучения физики взаимодействия частиц для того, чтобы потом управлять этим взаимодействием в нужную сторону.

При связности второго типа обычно используют различные способы механического рыхления. Однако в настоящее время начинают входить в практику способы, которые влияют на физико-химические процессы с тем, чтобы устранить нежелательные последствия. Эффект от применения специальных добавок иллюстрируется примером с калийной солью. С помощью применения незначительного количества присадок она практически перестала слеживаться.

На практике также пользуются приемом, суть которого заключается в том, чтобы не дать нежелательным процессам зайти слишком далеко, т.е. снижают нагрузки при хранении сыпучих материалов, не допускают длительного его хранения в неподвижном слое, снижают влажность насыпного материала и т.д.

Однако следует признать, что наиболее радикальными способами борьбы со слеживаемостью второго типа, вероятно, является поиск соответствующих присадок, устраняющих причину связности насыпного материала, сохраняя его качество.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Нерпин С.В., Дерягин Б.В. Поверхностные явления в механике грунтов.// Исследования в области поверхностных сил: Сб. докл. Изд. АН СССР, 1961.
2. Справочные материалы по физико-механическим свойствам пылевидных и порошковых грузов. -Л., ЛИВТ, 1973.
3. Испытание физико-механических свойств сырой марганцевой руды, промпродуктов обогащения и концентратов. Отчет о НИР. Механобрчермет. Рук. Работы П.А. Санжаровский, В.Д. Доценко. Кривой Рог, 1973.