

УДК 622.794

Е.И. НАЗИМКО, д.т.н., проф., Е.Е. ГАРКОВЕНКО, к.т.н., В.Г. НАУМЕНКО, инж.,
Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ОСАДКОВ ПРОДУКТОВ ОБОГАЩЕНИЯ, ИМЕЮЩИХ ЗНАЧЕНИЕ ПРИ ОБЕЗВОЖИВАНИИ

Приведені результати дослідження механічних властивостей тонкодисперсних осадів продуктів збагачення.

Приведены результаты исследования механических свойств тонкодисперсных осадков продуктов обогащения.

The results of researching of mechanical properties of fine sediments of mineral processing products are shown.

К товарным продуктам обогащения предъявляются определенные требования не только по качественным показателям, но и по содержанию влаги в них. Наиболее трудоемким и имеющим высокие энергетические расходы является удаление влаги из тонкодисперсных осадков. Количество мелких и тонких частиц в перерабатываемом сырье постоянно увеличивается. В частности, в рядовом угле содержание класса 0-1 мм увеличилось с 20 до 28% при одновременном повышении его зольности. Одним из наиболее распространенных процессов обезвоживания шламов и флотационных концентратов является фильтрование.

Как установлено многими исследованиями [1-4], структура осадков, особенно такая ее характеристика как проницаемость, оказывает значительное влияние на процессы удаления влаги. При исследовании поведения осадков и их пористой среды в различных условиях обезвоживания необходимо найти подходы к определению структуры осадков и их физико-механических свойств, т.к. формирование осадков вовлекает множество разнообразных физических процессов [5]. Главными из них являются гидродинамические, механические и фильтрационные процессы. В фазе формирования осадков важную роль играют механические процессы деформирования твердой фазы осадка на фоне фильтрационных процессов, сопровождающихся удалением влаги из пористого пространства. Механические процессы включают компрессию (сжатие осадка нормальными механическими усилиями), консолидацию (усадку твердой фазы во времени под действием постоянной нагрузки), сдвиг скелета твердой фазы под действием касательных напряжений.

Отсюда вытекает актуальность исследований, направленных на поиск эффективных методов воздействия на осадок для повышения скорости удаления влаги.

В процессе обезвоживания и формирования осадка возможны несколько основных режимов их деформирования. Первый – режим компрессионного сжатия, когда в осадке развиваются (увеличиваются) только нормальные деформации сжатия, в результате чего жидкая фаза выдавливается из пор и ловушек в режиме фильтрации. Второй режим чистого сдвига, когда возможны три проявления объемной деформации: сжатия в случае сдвига в недоконсолидированном осадке, разуплотнения в случае переконсолидированного осадка и сдвиг без изменения объема в пограничном случае. Третий режим смешанный, когда возможен сдвиг со сжатием [6].

Любые режимы или подрежимы со сдвигом положительно влияют на процесс фильтрации, поскольку они разрушают тупиковые поры и активно перестраивают структуру осадка, что повышает проницаемость и увеличивает скорость удаления жидкой фазы. [7]. Из механики грунтов известно, что испытания на сдвиг производят после предварительного уплотнения (консолидации) образца [8, 9]. Кроме того, сам режим консолидации осадка представляет интерес с практической точки зрения, поскольку такие режимы повсеместно встречаются во многих аппаратах, применяемых в технологии обогащения и обезвоживания [10]. В связи с этим необходимо испытать осадки обогащения в этих режимах.

Целью данной работы является исследование механических свойств тонкодисперсных осадков углеобогащения, имеющих значение при обезвоживании.

Перечисленные выше важные составляющие механической фазы формирования осадка характеризуются рядом параметров. Например, компрессионные характеристики осадка описываются коэффициентами компрессии, модулями деформации твердой фазы. При сдвиге твердой фазы касательными нагрузками необходимо знать предел прочности осадка на сдвиг, модуль сдвига, коэффициент разуплотнения и другие важные характеристики, которые не применялись в обогащении минерального сырья. Эти характеристики дают возможность оценить сжимаемость, прочность осадков, скорость фильтрации жидкости, а также энергоемкость механических процессов обезвоживания. Такие механические параметры широко применяются в механике грунтов. Существуют стандартные методики испытаний указанных характеристик и разработаны лабораторные установки для их проведения [8, 9].

В механике горных пород и грунтов различают такие понятия как плотность минеральной части и плотность скелета осадка, пористость и коэффициент пористости осадка, объем пор и объем минеральной части в единице объема осадка. Важными механическими характеристиками являются предел пластичности, предел текучести и число пластичности для глинистых осадков, коэффициент уплотненности для зернистых и глинистых осадков.

Пористость осадка - общий объем пор в единице объема осадка – определяется как:

$$n = 1 - m = 1 - \rho_{ск} / \rho_m, \quad (1)$$

где m - объем минеральной части в единице объема (1 см^3) осадка; $\rho_{ск}$ - плотность скелета осадка (плотность вещества осадка в данном объеме с учетом пор в сухом состоянии, без заполнения пор водой); ρ_m - плотность минеральной части осадка (масса скелета - твердой минеральной части - в единице объема осадка).

Коэффициент пористости осадка представляет собой отношение:

$$e = n / (1 - n) = (\rho_m - \rho_{ск}) / \rho_{ск}. \quad (2)$$

Объем пор в единице объема осадка (в 1 см^3) вычисляется через коэффициент пористости осадка по выражению:

$$n = e / (1 + e) = 1 - m \quad (3)$$

Число пластичности глинистой породы определяется по формуле:

$$I_p = W_T - W_p. \quad (4)$$

Здесь W_T и W_p – пределы текучести и пластичности соответственно.

Коэффициент уплотненности зернистых и глинистых осадков определяется как:

$$U = (e_{max} - e_{min}) / e_{min}. \quad (5)$$

Здесь e_{max} и e_{min} - максимальный и минимальный коэффициенты пористости осадка при различных способах его упаковки [1].

Осадки, содержащие в большинстве своем угольные или песчаные частицы, относятся к зернистым несжимаемым осадкам, тонкие глинистые осадки - к связанным. Отличительной особенностью таких осадков по сравнению с несвязанными (сыпучими) является то, что частицы в них и отдельные агрегаты связаны между собой. Эти связи могут быть пластичными (водно-коллоидными) и частично жесткими (цементационно-кристаллизационными) [11]. При этом от связанности частиц в осадке будет в значительной степени зависеть его сопротивление сдвигу, которое определяется силами сцепления.

При условии свободного удаления (оттока) жидкости любое внешнее давление, прилагаемое к водонасыщенным связанным осадкам, вызывает значительное изменение их влажности и плотности, что в свою очередь влияет на общее сопротивление сдвигу. Параметры сопротивления сдвигу зависят от приложенного давления и условий в точках контакта частиц.

Граничное сопротивление сдвигу при прямом плоском сдвиге определяется путем испытаний осадков на срезывательных устройствах, имеющих прообразом прибор Г. Тиме [12].

Осадки продуктов обогащения в значительной степени напоминают по своим физико-механическим свойствам глинистые песчаные грунты или супеси. Так, отходы флотации длиннопламенных и газовых углей аналогичны глинам, обладают текучестью и пластичностью, а концентраты близки к пескам.

Определение предела пластичности выполняется для глинистых осадков стандартным методом раскатывания в шнур [13]. Число пластичности осадка вычисляется по разнице между влажностями, соответствующими пределу текучести и пределу пластичности по соотношению (4). Для глинистых осадков определяется предел текучести. За предел текучести принимается влажность глинистого осадка, при которой специальный балансирный конус под действием собственного веса погружается в осадок на 10мм. Результаты испытаний физико-механических свойств продуктов обогащения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Некоторые физико-механические свойства осадков различного состава

Продукт	Плотность, кг/м ³	Общая пористость, %	Пределы пластичности, %		Число пластичности, %	Средний диаметр частиц, мм
			нижний	верхний		
Отходы флотации после фильтрпресса (ЦОФ Чумаковская)	1800	35	22	48	26	0,21
Сгущенный продукт гидроциклонов (ЦОФ Луганская)	1620	45	-	-	-	0,8
Шлам из илонакопителя ЦОФ Калининская	1660	40	17	31	14	0,25
Концентрат флотации ЦОФ Комсомольская	1530	52	-	-	-	0,3
Сгущенный продукт гидроциклонов ЦОФ Комсомольская	1620	41	-	-	-	0,65
Пески Вольногорского ГГМК	3560	55	-	-	-	0,3
Сгущенный продукт гидроциклонов ЦОФ Киевская	1650	47	-	-	-	0,7
Отходы флотации ЦОФ Киевская	1800	39	18	45	27	0,3
Концентрат флотации ЦОФ Киевская	1510	51	-	-	-	0,35

Как следует из представленных данных, отходы флотации и шламы илонакопителей обладают пластичностью и уменьшают пористость до 35% при приложении давления, что близко к поведению глинистых грунтов. Продукты с более высоким содержанием углистых частиц не обладают пластическими свойствами и имеют высокую остаточную пористость даже при сжатии. Такое поведение ближе к пескам [8]. Плотность осадков изменяется в широких пределах от 1510 до 3650 кг/м³. Общая пористость в уплотненном состоянии колеблется в пределах 35-55% . Число пластичности шлама накопителя ЦОФ Калининская равняется 14%, что попадает в диапазон пластичности суглинков, имеющих согласно стандарту диапазон пластичности от 7 до 17%. Число пластичности отходов флотации составляет 26-27% и попадает в диапазон пластичности глин (17-70%).

Компрессионные испытания осадков, которые необходимо обезвоживать в технологических схемах обогащения, ранее не проводились, однако такие испытания широко применяются в механике грунтов. Эти испытания позволяют оценить сжимаемость осадков, зависимость их пористости и водопроницаемости от давления и другие важные показатели, которые дают возможность правильно регулировать процесс обезвоживания.

Для исследования глинистых и зернистых углесодержащих осадков проведены испытания их на компрессию и консолидацию [13]. В ходе измерений обеспечивалось нагружение осадка с последовательным увеличением ступенями. При этом ступени выбирались так, чтобы каждая последующая нагрузка была не более чем в 2 раза больше предыдущей. Каждая ступень нагружения выдерживалась до условной стабилизации деформации. Степень консолидации осадка определялась как отношение усадки в данный момент времени к конечной усадке.

На рис. 1 показан пример консолидационных кривых испытаний отходов флотации ЦОФ Киевская, обогащающей коксующиеся угли шахты им. А.Ф.Засядько.

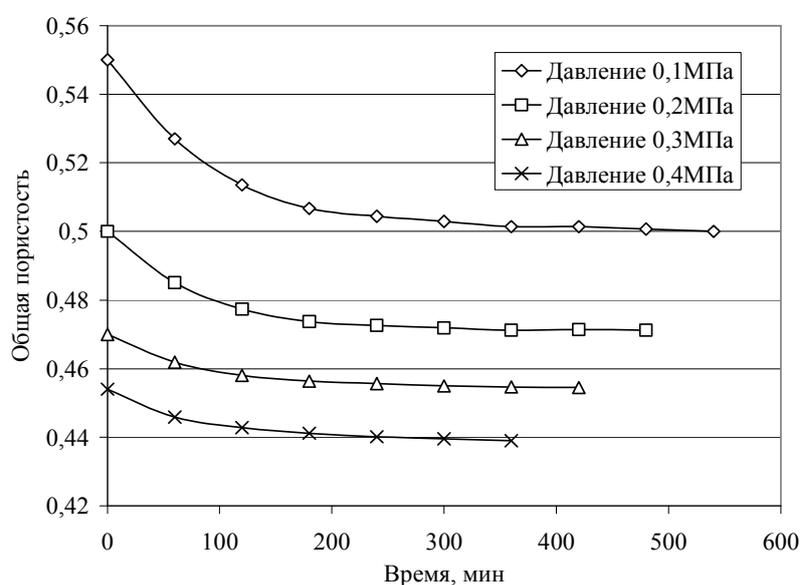


Рис. 1. Консолидационные кривые для отходов флотации ЦОФ Киевская

Кривые показывают, что по мере увеличения нагрузки сжатия осадка от 0,1 до 0,4 МПа его пористость уменьшается с 55% до 44%. При этом процесс полной консолидации образца длится десятки часов, хотя 85% консолидации происходит в течение нескольких минут.

Следует отметить, что сжатие образца последующей ступенью нагрузки начинается с консолидированного состояния, достигнутого на предыдущем этапе нагружения. Такие консолидационные кривые получают при компрессионных испытаниях образцов, в ходе обработки кривых определяют физико-механические и гидравлические свойства осадков. Результаты компрессионных испытаний продуктов обогащения представлены в табл. 2.

Как показывают данные табл. 2, коэффициент сжимаемости для разных продуктов изменяется в 2-3 раза, причем увеличение давления на осадок с 0,15 МПа до 1,2 МПа приводит к падению величины сжимаемости примерно на два порядка. Время консолидации осадков на разных стадиях уплотнения изменяется в несколько раз, а период консолидации для разных материалов отличается на порядок. При этом более длительная консолидация соответствует образцам, содержащим глинистые частицы. Период консолидации некоторых зернистых осадков длится минуты, что соизмеримо с временем пребывания осадков в обезвоживающих аппаратах. Время полной консолидации глинистых осадков достигает сотен минут. Это значит, что большинство сгустительных и обезвоживающих аппаратов (за исключением шламонакопителей) будут обезвоживать глинистые осадки в режиме неполной консолидации.

Таблица 2. Результаты компрессионных испытаний исследованных проб осадков

Продукт	Коэффициент компрессии, м ² /МН, при давлении, МПа		Модуль общей деформации, МПа, при давлении, МПа		Диапазон консолидации, мин.
	0,15	1,2	0,15	1,2	
Отходы флотации после фильтр-пресса (ЦОФ Чумаковская)	1,55	0,02	3,4	18,6	150-600
Сгущенный продукт гидроциклонов (ЦОФ Луганская)	2,4	0,012	1,9	32	2-25
Шлам из илонакопителя ЦОФ Калининская	1,2	0,026	2,2	12,6	20-250
Концентрат флотации ЦОФ Комсомольская	3,5	0,03	1,5	23,1	3-12
Сгущенный продукт гидроциклонов ЦОФ Комсомольская	2,5	0,021	2,9	30,2	5-35
Пески Вольногорского ГГМК	1,8	0,026	2,2	42	5-23
Сгущенный продукт гидроциклонов ЦОФ Киевская	3,1	0,036	1,6	13,8	10-40
Отходы флотации ЦОФ Киевская	1,8	0,015	3,2	22,1	210-800
Концентрат флотации ЦОФ Киевская	2,9	0,032	1,5	19,3	12-50

Таким образом, проведенные исследования физико-механических свойств тонкодисперсных осадков обогащения позволили определить ряд параметров, имеющих значение при механическом обезвоживании. Дальнейшие разработки могут быть направлены на исследование поведения осадков при наложении динамических воздействий.

Список литературы

1. **М.И. Бейлин.** Теоретические основы процессов обезвоживания углей. – М.: Недра, 1969. – 240 с.
2. **Г.Л. Майдуков.** Технология фильтрования продуктов обогащения углей. М.: Недра. – 1975. – 142с.
3. **Пейчев И.Д.** Исследование теоретических закономерностей течения жидкости через пористую среду // Обогащение полезных ископаемых. Днепропетровск. – 2004. – Вып. 20 (61). – С. 99-104.
4. **Назимко Е.И., Гарковенко Е.Е.** Микроструктура кека флотоконцентрата и ее роль в процессах обезвоживания // Збагачення корисних копалин. - 2000. - №9 (50). - С. 93-98.
5. **Гарковенко Е.Е.** Моделирование процесса вакуумного фильтрования угольных шламов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Москва. – 2004. - №1. – С. 317-319.
6. **Гарковенко Е.Е.** Исследование поведения осадков при наложении сдвиговых полей // Збагачення корисних копалин. – Дніпропетровськ. – 2006. – вип. 25(66)-26(67). – С. 160-166.
7. **Гарковенко Е.Е.** Интенсификация обезвоживания тонких труднофильтруемых осадков // Мат. міжнар. конф. „Форум гірників-2005”. Дніпропетровськ. – 2005. -Т.1. – с. 185-191.
8. **Н.С. Бирюков и др.** Методическое пособие по определению физико-механических свойств грунтов. М. Недра. 1975. – 178с.
9. **В.Д. Ломтадзе.** Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. М. Недра 1990. 328 с.
10. **В.С. Каминский.** Центробежное обогащение углей и сланцев. М. Недра. – 1967. 276 с
11. **Н.А. Цытович.** Механика грунтов. М.: Выща школа. – 1979. – 272 с.
12. **Гарковенко Е.Е.** Особенности обезвоживания тонких труднофильтруемых осадков // Сб. Трудов НГУ. – 2003. - № 17. – т.1. – С. 88-93.
13. **В.М. Безрук, М.Т. Кострико.** Геология и грунтоведение. М.: Недра. – 1969. – 264 с.