

УДК 622.764

**В.Г. НАУМЕНКО (ассистент)**

Донецкий национальный технический университет, Донецк

## **МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОСАДКОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ РЕЗУЛЬТАТЫ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ**

В работе приведена методика исследования свойств тонкодисперсных осадков углеобогащения при их деформировании на фоне фильтрационных процессов, а также обоснование параметров, определяющих технологию интенсификации обезвоживания осадков при действии механических сдвиговых деформаций, прилагаемых к осадку.

**Ключевые слова:** обезвоживание, уголь, шлам, влажность, осадок, структура осадка, механическое состояние, проницаемость, пористость, скорость, сдвиг, фильтрование, скорость фильтрации.

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

К товарным продуктам обогащения предъявляются требования не только по качественным показателям, но и по содержанию влаги в них. Наиболее трудоемким и имеющим высокие энергетические затраты является удаление влаги из осадков, сформированных из тонких классов.

Обезвоживание осадков шламовой крупности представляет наибольшую трудность, для решения данной задачи проводится большой комплекс теоретических и экспериментальных исследований в этом направлении.

Повышение эффективности обезвоживания тонкодисперсных осадков достигается за счет увеличения скорости удаления жидкости, снижения конечной влажности материала и производственных площадей, занимаемых оборудованием, на котором выполняется обезвоживание, повышения производительности аппаратов, уменьшения их стоимости и в целом затрат на процесс [98].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Значительная часть вопросов теории и практики исследована в работах отечественных и зарубежных ученых: Бейлина М.И., Бутовецкого В.С., Клешина А.А., Майдукова Г.Л., Надутого В.П., Полуляха А.Д., и других, а также научных коллективов институтов ИГТМ, УкрНИИ, НГУ, ДонНТУ. Этими исследованиями установлены основные закономерности процессов, протекающих при прохождении фильтрата и воздуха через слой осадка, закономерности фильтрования осадков в различных условиях, на их основе разработаны оригинальные конструкции оборудования и технологические параметры фильтрования.

**Постановка задач исследования.** Структура осадков, особенно такая ее характеристика как проницаемость, оказывает значительное влияние на процессы удаления влаги. При формировании осадка на рабочем органе обезвоживающего аппарата происходит ряд физических процессов, основные из которых - механические, гидродинамические и фильтрационные. К механическим относится деформирование твердой фазы осадка на фоне фильтрации жидкости, которое включает компрессию, консолидацию, сдвиг скелета твердой фазы под действием касательных напряжений.

Эти 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 про-

чности 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 энергоёмкость механических процессов обезвоживания.

Процесс истечения влаги из поровой среды осадка можно условно разделить на несколько более простых подпроцессов, которые будут отличаться между собой по физическим принципам, лежащим в их основе [1, 2,]. Главными из этих подпроцессов являются механические, гидродинамические и фильтрационные. В фазе, в которой происходит формирование осадка и его поровой структуры, важную роль играют механические деформации твердой фазы на фоне прохождения жидкости через пористое пространство. Эти механические процессы включают сжатие осадка механическими усилиями, перпендикулярными к поверхности осадка (нормальными), называемое в механике грунтов компрессией. Следующей фазой является усадка твердого скелета осадка под действием постоянно приложенной к нему нагрузки – консолидация. После этого может происходить сдвиг скелета твердой фазы осадка под действием приложенных касательных напряжений. Результатом этих процессов является перестройка порового пространства осадка, что влечет за собой изменение скорости удаления влаги в сторону увеличения или снижения. Отсюда вытекает актуальность исследований, направленных на поиск эффективных и относительно недорогих методов воздействия на осадок для повышения скорости фильтрации влаги из него.

При формировании осадка и удаления влаги из него возможны несколько основных режимов его деформирования. Первым является режим компрессионного сжатия. При этом в осадке обычно увеличиваются только нормальные деформации сжатия. В результате прохождения такого процесса жидкая фаза выдавливается из пор и замкнутых (тупиковых) ловушек в режиме фильтрации. Второй режим – режим чистого сдвига, при котором возможно несколько проявлений объемной деформации в осадке. При этом может происходить сжатие осадка, что имеет место при сдвиге в недоконсолидированном осадке. Другим возможным вариантом является разуплотнение, которое характерно для переконсолидированного осадка. В смешанном состоянии осадка сдвиг может происходить без изменения объема. Кроме перечисленных вариантов режимов возникают состояния осадка, при которых проявляется смешанный режим (третий), когда возможен сдвиг со сжатием. Все перечисленные выше режимы характерны для осадительных центрифуг, а также ленточных или камерных фильтр-прессов, вакуум-фильтров.

Рядом исследований было установлено, что любые подрежимы или режимы обезвоживания со сдвигом положительно влияют на процесс удаления влаги при фильтрации, т.к. при этом происходит переформирование поровой структуры осадка, разрушение тупиковых пор, что способствует повышению скорости удаления жидкой фазы.

В классических методах исследования, принятых в механике грунтов, испытания на сдвиг выполняются после предварительной консолидации (уплотнения) образца. Режим консолидации осадка имеет значение в практике, т.к. такие режимы имеют место во многих аппаратах, применяемых не только в технологии обогащения, но и обезвоживания продуктов. Поэтому осадки, характерные для продуктов обогащения необходимо испытать в режиме консолидации.

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.

Целью проведения такого эксперимента является определение колебаний скорости удаления влаги из осадка при разных режимах механического воздействия на него. Методики соответствующих испытаний осадков используются в механике грунтов. Для определения сдвиговых характеристик осадков по стандартным методикам применяются различные по конструкции приборы. К основным методикам относятся простой (прямой) сдвиг, вращательный срез, трехосное сжатие, кручение, одноосное сжатие, вдавливание конусов и др.

Для получения достоверных результатов исследуемый осадок должен иметь цилиндрическую форму или форму параллелепипеда. Испытание осадков выполняется по открытой или закрытой системе. Открытая система носит название консолидировано-дренированной, результаты испытаний по этой системе зависят от прилагаемого давления. Поэтому готовят несколько образцов осадка и уплотняют их при небольшом одинаковом для всех давлении до полной стабилизации деформаций. Это значит, что осадок переходит в переконсолидированное состояние. Затем давление постепенно снижают до стабилизации деформаций разуплотнения. После этого осадок испытывают на сдвиг. При этом каждому давлению соответствует определенные характеристики осадка по влажности и пористости.

Сопrotивляемость осадков сдвигу зависит от их влажности. Однако, для зернистых осадков, представленных сгущенными продуктами гидроциклонов, угольными шламами, влажность практически не влияет на этот параметр. Для таких испытаний осадков определяющим параметром является их плотность, которая в механике грунтов выражается через пористость по соотношению.

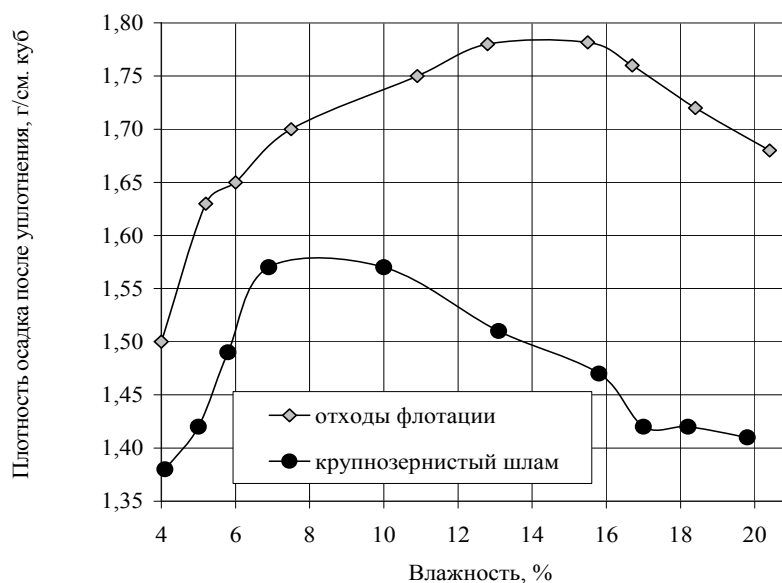


Рис. 1. Изменение плотности осадков углеобогащения после уплотнения в зависимости

$$m = 1 - \delta_{ск}/\delta_{м}, \quad (1)$$

где  $\delta_{ск}$  и  $\delta_{м}$  – плотность скелета осадка и плотность минеральной части, соответственно.

Плотность скелета осадка представляет собой плотность вещества осадка в данном объеме с учетом пор в сухом состоянии и определяется как отношение массы твердой части (скелета) к общему объему осадка (твердое вещество плюс поры между частицами), без заполнения пор водой.

Плотность минеральной части сухого осадка определялась как отношение массы скелета (твердой части) к объему осадка. Для определения использовался пикнометрический способ.

Исследование физико-механических свойств осадков углеобогащения выполнялось в лаборатории физического и компьютерного моделирования ДонНТУ.

На рис. 1 приведены результаты исследования плотности разных по вещественному составу и крупности осадков в зависимости от их влажности.

На рис. 1 видно, что кривые изменения плотности осадков имеют разный вид для осадков различного вещественного состава и гидрофобности. Данные позволяют заключить, что зернистый шлам – сгущенный продукт гидроциклонов – имеет максимальную плотность осадка при влажности 7-13%. В воздушно-сухом состоянии и при влажности более 15% плотность осадка после уплотнения снижается. В первом интервале влажности (до 7%) в порах осадка остается воздух, во втором – более 15% - при уплотнении из пор выдавливается влага и плотность снова снижается.

Для отходов флотации, являющихся гидрофильным продуктом и содержащих глинистые частицы в большом количестве, характерно повышение плотности до значения более  $1,75 \text{ г/см}^3$  при влажности выше 11%. При увеличении влажности свыше 16% плотность этого материала начинает снижаться и при влажности 21% достигает величины  $1,67 \text{ г/см}^3$ .

Коэффициент пористости осадка  $\varepsilon$  может быть вычислен по этим параметрам из соотношения:

$$\varepsilon = (\delta_m - \delta_{ск}) / \delta_{ск}. \quad (2)$$

Результаты определения коэффициента пористости в зависимости от приложенного давления для отходов флотации ЦОФ Красноармейская показаны на рис.2.

Из данных следует, что коэффициент пористости глинистых осадков резко снижается при повышении давления. Обработка данных дала возможность получить аналитический вид такой зависимости в виде полинома третьей степени с высокой степенью аппроксимации:

$$\varepsilon = -0,55P^3 + 1,66P^2 - 1,64P + 1,19; \quad R^2 = 0,987.$$

Для определения изменения пористости под действием приложенного давления проведены компрессионные испытания осадков. При выполнении измерений нагружение осадка производится не сразу, а ступенчато. В каждой ступени обеспечивается увеличение нагрузки примерно в два раза по сравнению с предыдущим нагружением. В каждой ступени осадок выдерживается под нагрузкой до момента стабилизации деформаций. После этого степень усадки осадка определялась как отношение усадки на данной ступени испытаний к конечной усадке. В общем виде кривые компрессионных испытаний имеют вид, приведенный на рис.3 .

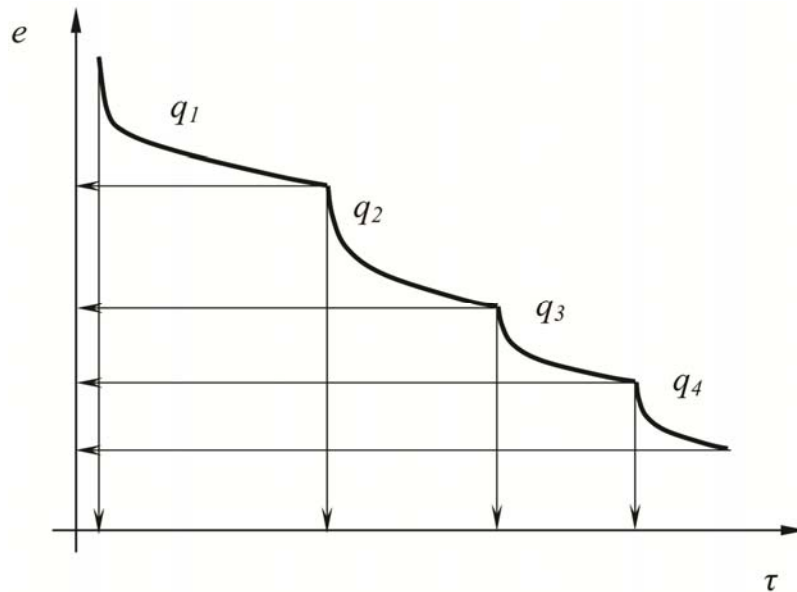


Рис. 2. Кривые компрессионных испытаний для осадков углеобогащения

Установлено, что для осадков углеобогащения (отходы флотации) имеется определенное значение нагрузки  $q$ , при котором деформация осадка имеет небольшое значение. В механике грунтов считается, что в таком случае деформации могут быть упруго-вязкими или упругими, т.е. исчезать при снятии нагружения. В случае, когда деформации относятся к упруго-вязким, скорость изменения относительной деформации незначительная и практически не зависит от высоты осадка и условий протекания жидкости. Аналогичные процессы происходят в осадках при обезвоживании на ленточных фильтрах, при формировании осадков в фильтр-прессах в начальной стадии процесса и др. Указанная выше нагрузка  $q$  носит название структурной прочности осадка и обозначается как  $q_{стр}$ .

В случаях, когда приложенная к осадку нагрузка имеет значение, превосходящее величину  $q_{стр}$ , деформации в осадке происходят более интенсивно. Но, тем не менее, процесс переформирования осадка может быть длительным. Часто его завершение не удастся определить при выполнении одного эксперимента. На практике такие режимы имеют место в осадительных центрифугах и на конечной стадии обезвоживания в фильтр-прессах.

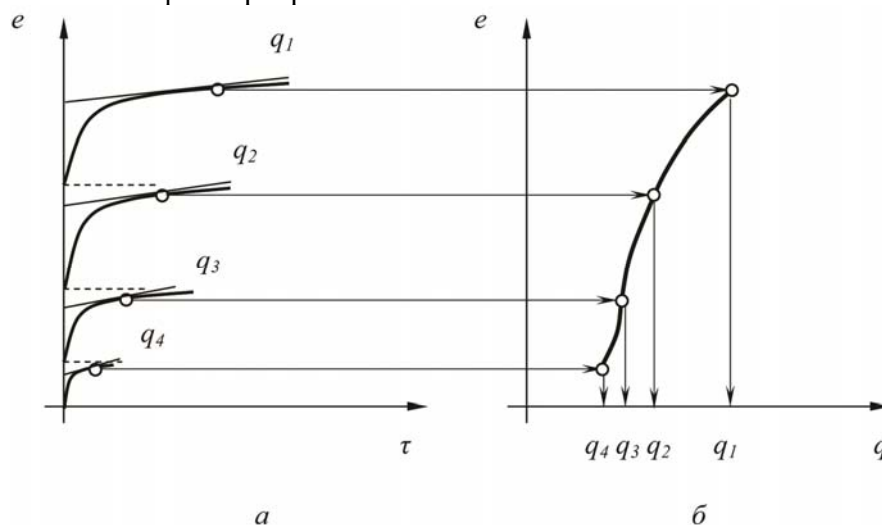


Рис. 3. Порядок построения консолидационной кривой:  
 $a$  – начальные данные,  $b$  – консолидационная кривая

Время достижения осадком определенной заданной относительной деформации находят по известным из механики грунтов соотношениям

На базе этих определений получают значение структурной прочности осадка, для чего используется стандартная компрессионная кривая. Эта кривая показывает зависимость относительной деформации образца (или его пористости) от прилагаемой нагрузки  $q$  (рис.3).

В каждой ступени нагружения определяется конечная деформация осадка. Конечной считается деформация, на превышающая 0,02 мм/сут.

Обработка результатов компрессионных испытаний по стандарту выполняется в два этапа. На первом этапе снимают показания часовых индикаторов деформаций, определяют общую деформацию образца, затем относительную и строят кривые зависимости относительных деформаций на каждом этапе нагружения от времени опыта (рис.4 б).

Относительные деформации  $e$  вычисляют по формуле:

$$e = \Delta h / h_0 . \quad (3)$$

Здесь  $\Delta h$  – изменение высоты осадка под действием пригружения;  
 $h_0$  – первоначальная высота осадка.

Значение времени  $\tau_l$  зависит от вида осадка, его начального состояния, нагрузки на осадок, пути дренирования воды в порах осадка и др.

Кривая консолидации показывает, как происходят деформации  $e$  исследуемого образца при заданном пригружении с течением времени. Консолидационные кривые дают информацию для определения физико-механических и гидравлических характеристик исследуемых образцов осадков. Из механики грунтов известно, что наибольшая усадка образцов происходит в начале эксперимента за относительно небольшое время. Затем процесс замедляется, о чем свидетельствуют и графики, показанные на рис. 4.3.

По данным консолидационных испытаний строят серию графиков в координатах « $e_l/e_k - q$ », « $\tau_l - q$ », « $e_l - q$ », « $m_q - q$ », « $e_l/e_l - (\lg \tau_i - \lg \tau_l)$ ». Из этих графиков определяют консолидационные параметры: относительную усадку образцов  $e_l$  и соответствующий ей момент времени  $\tau_l$ , параметр  $m_q$  и соответствующие ему значения величин пригружения осадков.

Выполненные таким образом исследования физико-механических свойств осадков позволяют определить такие параметры как структурная прочность осадка при компрессионном сжатии  $q_{cmp}$ , коэффициент уплотнения осадка  $a$ , стандартный модуль усадки  $e_q^c$  и модуль стандартной компрессии  $E_c$ , модуль усадки и другие параметры. Результаты определений, которые проводились совместно, подробно изложены в работах.

На рис. 4 приведены в качестве примера консолидационные кривые для отходов флотации ЦОФ Красноармейская, полученные при разных значениях пригружения.

Для отходов флотации ЦОФ Киевская и ЦОФ Калининская получены аналогичные зависимости. Такие испытания направлены на оценку сжимаемости осадков и изменение их водопроницаемости в зависимости от давления. Из кривых следует, что при увеличении пригружения осадка его пористость снижается с 54% до 40,5%.

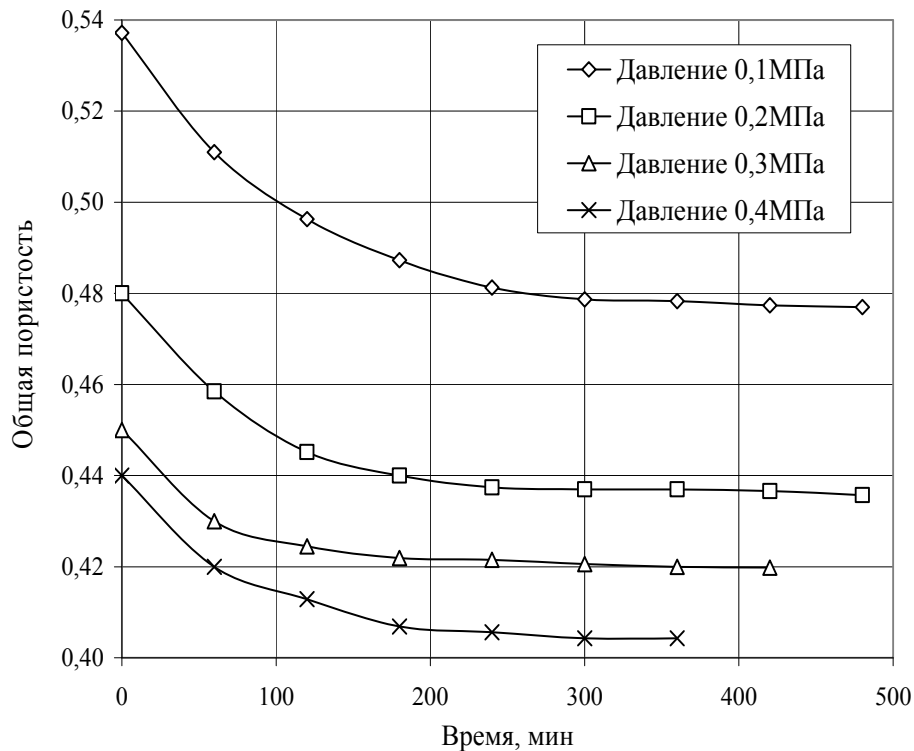


Рис.4. Связь коэффициента пористости с прилагаемым к осадку давлением

Из данных, полученных на практике, следует, что коэффициент сжимаемости осадков сильно зависит от приложенного давления. При увеличении давления от 0,1 до 1,5 МПа снижает сжимаемость более, чем в 100 раз. В зависимости от вещественного состава и крупности продуктов этот параметр изменяется в несколько раз. Время консолидации так же значительно изменяется в зависимости от того, какая стадия нагружения выполняется. При этом период консолидации образцов разного вещественного состава существенно различается. Для глинистых осадков, представленных отходами флотации, время консолидации имеет максимальные значения. Зернистые осадки (сгущенные продукты гидроциклонов) консолидируются быстрее на порядок. Концентраты флотации, содержащие низкочольные угольные частицы с гидрофобной поверхностью, имеют минимальное время консолидации.

Большая длительность консолидации глинистых осадков свидетельствует о том, что многие сгустители, применяемые для обработки этого продукта, работают в режиме неполной консолидации осадка. Указанное не относится к фильтр-прессам и илонакопителям. В первом случае высокое давление способствует ускорению процесса консолидации осадка, во втором – значительное время и высокая площадь отстойника.

Объем пор в единице объема осадка (в  $1 \text{ см}^3$ )  $v$  вычислялся через коэффициент пористости:

$$v = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} = 1 - m. \quad (3)$$

Осадки, состоящие в основном из угольных или песчаных частиц, относятся к зернистым несжимаемым. Во влажном состоянии зернистые осадки имеют определенное сцепление между частицами. Одной из причин сцепления является наличие капиллярных сил. При полном погружении осадков в воду это сцепление ослабевает или исчезает полностью вследствие обводненного состояния осадков. Второй причиной служит заклинивание зернистых частиц при их тесном контакте друг с другом, возникающее из-за неправильной формы частиц, наличия впадин и выступов на их поверхности. В механике грунтов этот тип сцепления рассматривается как разновидность жесткого сцепления. Для такого типа осадков, находящихся в переконсолидированном состоянии, усилие сдвига обычно имеет максимум, а затем установившееся практически постоянное значение.

Тонкие глинистые осадки, например отходы флотации, относятся к связанным осадкам. Отличительной особенностью таких осадков по сравнению с несвязанными (сыпучими) является то, что частицы в них и отдельные агрегаты, образованные из этих частиц, связаны между собой. Связи могут иметь разный характер - быть пластичными (водно-коллоидными) или частично жесткими (цементационно-кристаллизационными). При этом сопротивление сдвигу, определяемое силами сцепления между частицами, зависит от связанности частиц в осадке.

Для глинистых пород важным фактором является число пластичности, которое представляет собой разность предела текучести и предела пластичности:

$$I_n = W_m - W_n, \quad (4.4)$$

где  $I_n$  – число пластичности;  
 $W_m$  и  $W_n$  – пределы текучести и пластичности, соответственно.

Зернистые осадки с низким содержанием глины – концентраты флотации – имеют пористость в пределах 50%, не обладают пластичностью. Следует ожидать, что под действием давления в определенных пределах, их пористость значительно не снизится.

Сгущенные продукты гидроциклонов характеризуются наибольшим значением среднего диаметра частиц – 0,65-0,8мм, пористость находится в пределах 41-45% за счет большого количества частиц с размером 1-3мм.

### **Выводы и направления дальнейших исследований**

Таким образом, описанные выше методики позволяют определить изменение механических свойств тонкодисперсных осадков углеобогащения при различных воздействиях, определен ряд параметров, которые имеют важное значение при механическом воздействии на осадок при обезвоживании в таких аппаратах, как ленточные фильтры и пресс-фильтры, осадительные центрифуги.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на экспериментальное определение ряда механических свойств осадков углеобогащения при их фильтрации.

### **Список использованной литературы**

1. Морозова В.Г. Аналітичне дослідження впливу проникності осадів на переміщення речовини в порах / О.І. Назимко, Є.Є. Гарковенко, В.Г. Морозова // Обогащение полезных ископаемых. – 2004. – Вып. 20(61). – С. 83-88.



2. Гарковенко Е.Е. Исследование поведения осадков при наложении сдвиговых полей / Е.Е. Гарковенко // Збагачення корисних копалин. – 2006. – Вип. 25(66)-26(67). – С. 160-166.
3. Науменко В.Г. Исследование свойств тонкодисперсных осадков продуктов обогащения, имеющих значение при обезвоживании / Е.И. Назимко, Е.Е. Гарковенко, В.Г. Науменко // Разработка рудных месторождений. – 2007. – №91. – С. 117-121.
4. Науменко В.Г. Методика исследования свойств тонокодисперсных осадков углеобогащения при их механическом обезвоживании / В.Г. Науменко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2007. – Вип. 29-30 – С. 178-184.
5. Науменко В.Г. Методика исследования и экспериментальная установка для определения параметров тонкодисперсных осадков / В.Г. Науменко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна. - 2008. - Вип. 15(131). – С.127-133.
6. Науменко В.Г. Испытания и тарирование установки для исследования обезвоживания шламов / Е.И. Назимко, В.Г. Науменко, Н.А. Куриленко // Збагачення корисних копалин. – 2010. – Вип. 41(82)-42(83). – С. 237-243.
7. Науменко В.Г. Моделирование процесса удаления влаги из углесодержащих осадков. / Е.И.Назимко, В.Г. Науменко // Збагачення корисних копалин. – 2011. – Вип. 45(86) – С. 153-158.

*Надійшла до редакції 30.12.2013*

В.Г. Науменко

#### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОСАДКІВ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ РЕЗУЛЬТАТИ МЕХАНІЧНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ

В роботі приведена методика дослідження властивостей тонкодисперсних осадків вуглезбагачення при їх деформації на фоні фільтраційних процесів, а також обґрунтування параметрів, що визначають інтенсифікацію зневоднення вугільних шламів шляхом встановлення залежності швидкості фільтрації рідини від швидкості прикладення зсувних зусиль та від механічного стану осаду.

Ключові слова: зневоднення, вугілля, волога, осад, структура осаду, механічний стан, проникність, пористість, швидкість, зсув, фільтрування, швидкість фільтрації.

V.G. Naumenko

#### RESEARCH TECHNIQUE OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SEDIMENTS DETERMINING THE RESULTS OF MECHANICAL DEWATERING

The scientific value of this work consists in finding out the influence of shear velocity and sediment state on the velocity of water removing from porous stricture in filtration process.

Keywords: dewatering, coal, slime, sediment, mechanic state, shear, velocity, filtration.