



УДК 658.567.1:669.2.012.3.004.18+574

**А.А. АТАМАНЮК**, аспирант

Украинский научно-исследовательский институт экологических проблем (УкрНИИЭП), г. Харьков

**А.М. КАСИМОВ**, докт. техн. наук, профессор, главный научный сотрудник

Государственное предприятие «Украинский научно-технический центр металлургической промышленности «Энергосталь» (ГП «УкрНТЦ «Энергосталь»), г. Харьков

## СПОСОБ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАМОВ

Описан способ исследования фильтрационных свойств осадков, образованных взвешенными частицами, входящими в состав производственных сточных вод. Представлены устройство лабораторной установки и методика проведения экспериментов. Предлагаемый способ позволяет определять оптимальные параметры процесса фильтрации под воздействием постоянного электрического тока в зависимости от влияния переменных факторов. Он применялся для экспериментальных исследований по интенсификации гравитационного обезвоживания металлургических шламов на комбинате «Запорожсталь». Полученные данные могут использоваться при проектировании и эксплуатации сооружений по обезвреживанию и утилизации осадков производственных сточных вод.

**Ключевые слова:** металлургические шламы, осадки, коэффициент фильтрации, обезвоживание, постоянный электрический ток.

В настоящее время уровень накопления промышленных отходов на территории Украины достиг примерно 35 млрд т, из которых ~4,5 млрд т являются токсичными. Наиболее интенсивно накопление отходов происходит в промышленно развитых регионах страны. Только в Кривбассе объем отходов горнодобывающего и обогатительного комплексов достигает 450 млн т/год. В Донецком регионе масса отходов, образующихся при добыче угля, составляет 65 млн т/год, при обогащении – 32 млн т/год. Большое количество отходов образуется в теплоэнергетике при сжигании твердого топлива – ежегодно их накапливается около 14 млн т [1].

Общая площадь земель, которую занимают только указанные виды отходов, достигает почти 45 тыс. га. К этому следует добавить отходы металлургического комплекса (шлаки доменного, сталеплавильного, ферросплавного производства и т.п.), общая масса которых составляет ~22 млн т/год. Такие отходы находятся в породных отвалах, хвостохранилищах, шламонакопителях, золошлакоотвалах. Отходы многих предприятий горнорудной, металлургической промышленности размещены как на территории самих предприятий, так и в границах населенных пунктов. Крупнотоннажные отходы образуют техногенные скопления ценных компонентов и в то же время являются постоянными источниками загрязнения окружающей природной среды.

Главным источником образования шламов в черной металлургии являются основные технологические агрегаты металлургического производства – агломерационные машины, доменные и сталеплавильные печи. Шламы и пыль газоочистных устройств представляют собой остатки сырья и продуктов его переработки. Для улавливания мелкодисперсных пылевых частиц применяют разнообразные сухие и мокрые газоочистные и сантехнические сооружения. Образующиеся в мокрых газоочистках шламы отличаются по своим химическим и физико-механическим свойствам [2].

В зависимости от химического состава шламы разделяются на три группы:

- железосодержащие, получаемые при очистке газов доменного, агломерационного и сталеплавильного производств;
  - серосодержащие, образующиеся при мокрой очистке агломерационных газов от оксидов серы;
  - прочие (не содержащие соединений железа), к числу которых относятся шламы печей для обжига нерудного сырья, шламы коксохимического производства и др.
- По способу образования отходы первой и третьей групп можно разделить на три вида:
- шламы механического происхождения (образуются в результате дробления, истирания, пересыпания шихтовых материалов);

- шламы термического происхождения (образуются в обжиговых печах, на агломерационных лентах и др.);
- шламы, содержащие возгоны (образуются в результате испарения различных элементов и последующей конденсации их паров); к ним следует отнести также шламы газоочисток кислородных конвертеров и мартеновских печей, работающих с продувкой ванны, которые образуются в зоне контакта кислородной струи с чугуном.

Шламы первых двух групп относят к разряду крупнодисперсных: их твердые частицы имеют медианные размеры от единиц до десятков микронов. Возгонные шламы являются тонкодисперсными: размеры их частиц в основном не превышают 1 мкм.

Основные методы подготовки шламов – механическое обезвоживание, смешивание, термическая обработка и окускование. В черной металлургии и химической промышленности СССР в 70–80-х гг. XX в. был принят ряд решений по очистке промышленных сточных вод [3]. Обезвоживание шламов предписывалось проводить по двухступенчатой схеме с классификацией по зерну и обезвоживанием крупного класса на ленточных вакуум-фильтрах, что в последующем нашло отражение в [4].

Многие исследователи рекомендуют осуществлять выбор обезвоживающего оборудования исходя из величины удельного сопротивления осадка. Автором [5] было установлено, что для успешного осуществления обезвоживания гидроокисных осадков, образующихся при очистке природных вод, их удельное сопротивление не должно превышать величины  $(30\text{--}50)\cdot10^{-10}$  см/г. Согласно [6] вакуум-фильтры целесообразно применять для обезвоживания осадков, имеющих удельное сопротивление до  $20\cdot10^{-10}$  см/г.

По данным [7], для бесперебойной работы вакуум-фильтров удельное сопротивление осадков городских сточных вод после коагуляции их химическими реагентами должно составлять  $(5\text{--}60)\cdot10^{-10}$  см/г. Время цикла фильтрации в зависимости от удельного сопротивления составляет 2–8 мин. В работе [8] даются рекомендации по выбору обезвоживающего оборудования в зависимости от величины удельного сопротивления осадка. Важнейшими свойствами шламовых осадков являются характер капилляров, водопроницаемость и влагоемкость – способность вмещать и удерживать определенное количество воды (различают влагоемкость полную, капиллярную и молекулярную [9]). Однако роль этих свойств в оценке не одинакова и зависит от состава шламов. Разным является и их значение при решении практических вопросов.

Академик Ребиндер П.А. подразделял воду в составе дисперсных материалов на химически связанный (входя-

щую в кристаллическую решетку материала), адсорбционную (мономолекулярный слой), капиллярно связанную и свободную (заполняющую пористое пространство) [10]. Полной влагоемкости соответствует полное насыщение осадка водой, т.е. заполнение ею всех его пор. Как известно, пористость осадочных пород характеризуется цифрами, изменяющимися в весьма широких пределах. Так, пористость ила может достигать 70–80 %, глин и суглинков – 40–50 %, песков – 30–40 % [11].

Для нахождения коэффициента фильтрации шламовых осадков применяется ряд лабораторных методов. Определение этой величины может осуществляться двумя путями: на основании экспериментальных данных, получаемых при разделении суспензий фильтрованием, с использованием для их обработки расчетных уравнений фильтрования; на основании данных о свойствах твердых частиц суспензии и структуре осадка, получаемых различными (обычно косвенными) способами. Первый способ применяется для практических целей. Второй значительно сложнее и не гарантирует получения надежных результатов. В общем случае величина удельного сопротивления осадка  $r$  определяется по формуле

$$r = 2PF^2b/\mu X_b \quad (1)$$

где  $P$  – давление фильтрования;  $F$  – площадь фильтрующей поверхности;  $\mu$  – вязкость фильтрата;  $b=t/V^2$  – константа фильтрования, определяемая опытным путем ( $t$  – время фильтрования,  $V$  – объем выделяемого фильтрата);  $X_b$  – отношение массы твердой фазы накопленного осадка к объему фильтрата.

Величина  $X_b$  определяется, как правило, расчетным путем по следующей формуле

$$X_b = (1+X_0)C \quad (2)$$

где  $C$  – концентрация исходного осадка, г/см<sup>3</sup>;  $X_0$  – отношение объема накопленного осадка к объему фильтрата.

На практике величину  $X_b$  заменяют величиной  $C$ , считая при этом, что  $X_0=0$ , т.е. объем накопленного осадка мал по сравнению с объемом фильтрата. Однако разница между величинами  $C$  и  $X_b$  (например, в случае уплотненных активных илов, особенно при применении флокулянтов) может достигать 100 % и более.

Самый надежный метод определения величины  $X_0$  заключается в фильтровании осадка на погружной воронке с последующим измерением объемов накопленного осадка и фильтрата. Иногда величину  $X_0$  можно достаточно просто и точно определить на воронке Бюхнера по предельному количеству фильтрата при гравитационном фильтровании [9]. Недостатком рассмотренных методов



является то, что они основаны на механических способах фильтрации шламов и не в полной мере отражают их способность к фильтрации, так как из осадка удаляется только капиллярная влага.

Наиболее близким к предлагаемому авторами статьи методу является способ исследования коэффициента фильтрации песчаных грунтов [11] в трубке Каменского, заключающийся в определении скорости прохождения воды через слой песка и расчете коэффициента фильтрации по формуле

$$K_{\phi} = I/t f(S/h), \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент фильтрации, см/с;  $I$  – длина пути фильтрации, см;  $t$  – время понижения уровня воды в трубке от «0» до деления «3» или «5», с;  $S$  – понижение уровня воды в трубке (см) за время  $t$ , с;  $h$  – первоначальный напор, см.

Недостатком этого метода является то, что он разработан для изучения коэффициента фильтрации песков, которые обладают сравнительно высокой пористостью и водопроницаемостью. Металлургические шламы содержат в основном илистые частицы размером менее 0,005 мм, которые образуют осадки с низкой водопроницаемостью. Такие осадки способны удерживать в себе молекулярную (пленочную или гигроскопическую) воду, т.е. воду, не заполняющую пустоты и поры, а лишь находящуюся на поверхности частиц осадка в виде пленок или капель, препятствующих фильтрации.

Авторами [12] поставлена задача разработать способ исследования коэффициента фильтрации, в котором за счет обработки осадка электрическим током обеспечивается расширение функциональных возможностей сконструированной установки, что позволяет производить исследования шламов сточных вод металлургических предприятий.

Для решения этой задачи разработана лабораторная установка (рис. 1).

Движение воды начинается в ней при подаче напряжения постоянного электрического тока. Установка включает стеклянный цилиндр 1, закрепленный на подставке 2 с дренажной перегородкой 3, поддерживающей дренажный слой из песка 4, графитовых электродов 5, закрепленных на поплавках, источник питания постоянного тока 6, амперметр 7, поддон для сбора фильтрата 8 с патрубком для его отвода 9, расположенным в одной плоскости с дренажной перегородкой, а также емкость для сбора избыточного фильтрата 10 и термометр 11.

Установка работает следующим образом. Стеклянный цилиндр 1 устанавливают на подставку 2 с дренажной перегородкой 3. На эту перегородку насы-

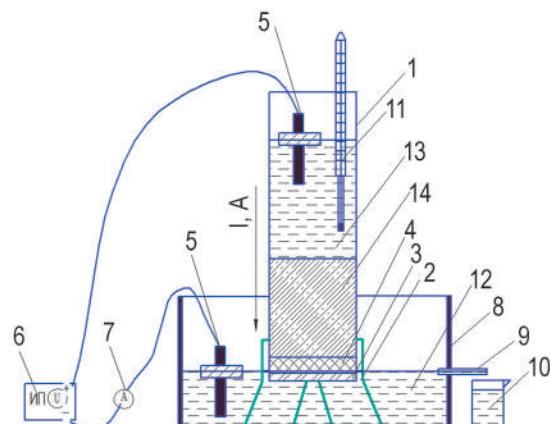


Рисунок 1 – Установка для исследования коэффициента фильтрации metallurgических шламов:

1 – стеклянный цилиндр; 2 – подставка; 3 – дренажная перегородка; 4 – дренажный слой из песка; 5 – графитовые электроды; 6 – источник питания постоянного тока; 7 – амперметр; 8 – поддон для сбора фильтрата; 9 – патрубок для отвода фильтрата; 10 – емкость для сбора избыточного фильтрата; 11 – термометр; 12 – фильтрат; 13 – слой осветленной жидкости; 14 – слой осадка

пают слой дренажной загрузки 4, состоящей из речного песка фракций 0,5–1,0 мм. Подставку 2 помещают в стеклянный поддон для сбора фильтрата 8. Готовят пробу сточных вод, содержащую 300–400 г/дм<sup>3</sup> взвешенных веществ, и пробу сточных вод того же химического состава с концентрацией взвешенных веществ 50–70 мг/дм<sup>3</sup>.

Поддон для сбора фильтрата 8 заполняют водой с концентрацией взвешенных веществ 50–70 мг/дм<sup>3</sup> до уровня патрубка для отвода фильтрата 9, по которому избыточный фильтрат попадает в емкость 10. Пробу сточных вод, содержащую 300–400 г/дм<sup>3</sup> взвешенных веществ, тщательно перемешивают и заливают в стеклянный цилиндр 1, после чего приступают к установке электродов. Электроды 5, состоящие из химически нейтрального материала (графита), закрепляют на поплавках и размещают на поверхности жидкости в цилиндре 1 и на поверхности фильтрата 12 (в поддоне для сбора фильтрата 8). Затем производят подключение электродов к источнику питания постоянного тока 6 и включают его.

При наложении разности потенциалов на исследуемую пробу сточных вод происходит ее интенсивное расслоение с образованием осадка 14 на поверхности дренажного слоя из песка 4 и слоя осветленной жидкости 13. В электрическом поле происходит уменьшение сил молекулярного взаимодействия частиц, и вода начинает вытекать из пор осадка 14, т.е. идет процесс фильтрации. Избыточный фильтрат 12 через патрубок 9 переливается в емкость для сбора фильтрата 10.

Горизонтальная ось патрубка для отвода фильтрата 9 совпадает с поверхностью дренажной перегородки 3, благодаря чему в этой плоскости автоматически поддерживается уровень фильтрата 12, что обеспечивает непрерывность действия постоянного электрического тока и равномерность процесса фильтрации. Данная плоскость является границей перехода жидкости 13 из осадка 14 через песчаный дренажный слой 4 в поддон для сбора фильтрата 8, при этом используется градиент гидравлического напора столба осветленной жидкости 13, расположенного над слоем осадка 14.

С помощью секундометра определяют время понижения уровня осветленной жидкости 13 в стеклянном цилиндре 1 по мерной шкале (с шагом делений 1 мм), нанесенной на стенку цилиндра. Температуру воды замеряют термометром 11. Опыт проводят до тех пор, пока вся осветленная жидкость 13 не профильтруется через слой осадка 14. На основании полученных данных по формуле (3) вычисляют коэффициент фильтрации. Показания амперметра 7 используют для расчетов количества затраченного электричества и электропроводности осадка 14 в зависимости от его свойств.

Установка позволяет исследовать осадки производственных сточных вод в широком диапазоне значений напряжения постоянного тока. По скорости перемещения уровня осветленной жидкости определяют оптимальные условия для получения максимального коэффициента фильтрации. Полученные данные могут быть использованы при проектировании и эксплуатации сооружений по обезвреживанию и утилизации осадков производственных сточных вод.

Разработанный способ применен для исследований по интенсификации гравитационного обезвоживания металлургических шламов на комбинате «Запорожсталь». При проведении экспериментов учитывали данные по перемещению границы расслоения фаз суспензии, температуру суспензии, силу постоянного электрического тока и перепады уровня фильтруемой суспензии. На рис. 2 показаны одновременно зафиксированные показатели удельной электропроводности, электрохимического потенциала и коэффициента фильтрации шламов газоочисток агломерационного цеха [13, 14].

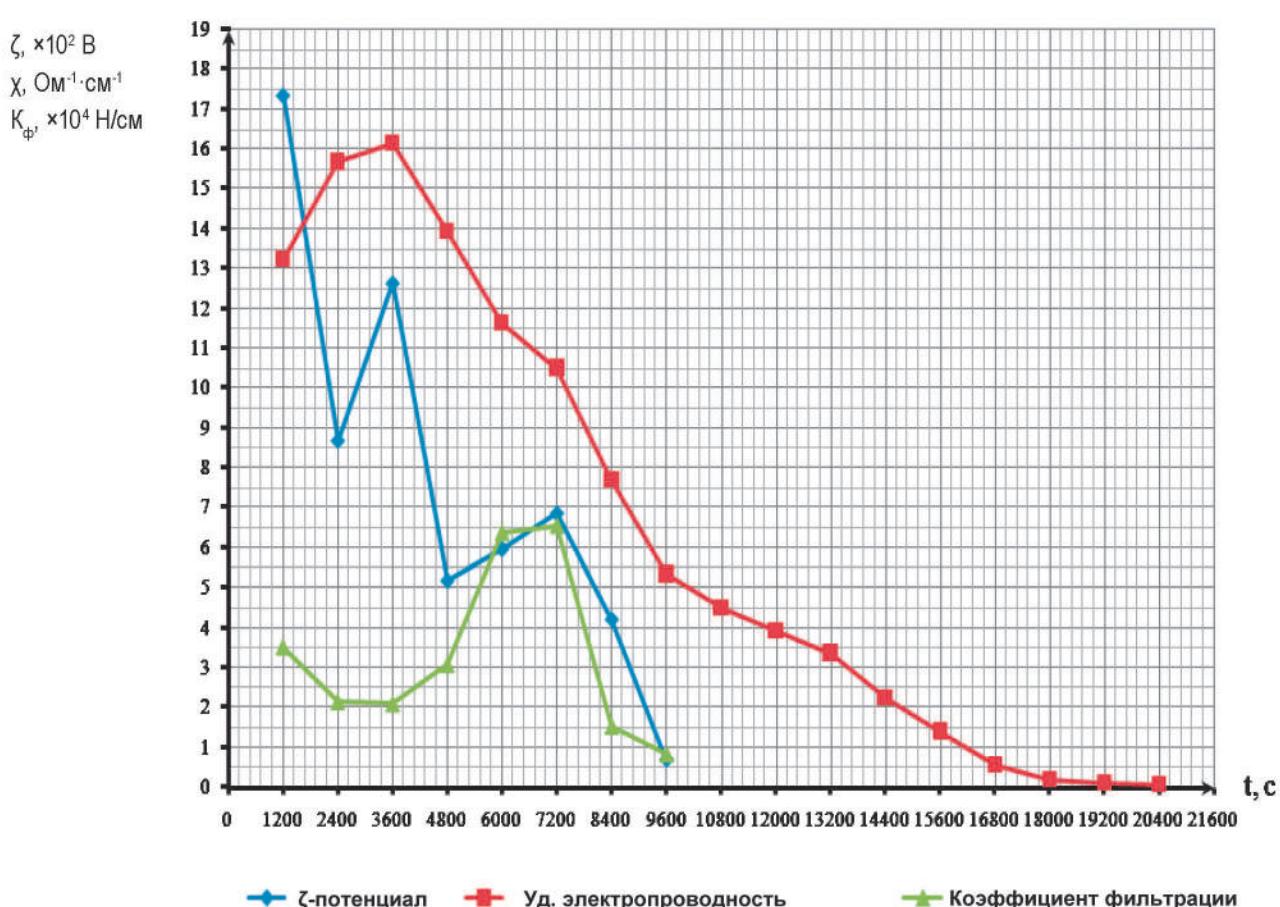


Рисунок 2 – Зависимость изменений  $\zeta$ -потенциала (В), удельной электропроводности ( $\text{Om}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ), коэффициента фильтрации ( $\text{H/cm} \cdot 10^{-7}$ ) от продолжительности обработки агломерационных шламов постоянным электрическим током



## ВЫВОДЫ

Разработанный метод определения коэффициента фильтрации шламов позволил получить данные для создания способа гравитационного обезвоживания железосодержащих шламов газоочисток металлургической промышленности с их обработкой постоянным электрическим током. В результате обеспечивается значительное сокращение влажности осадка.

Предложенная аппаратурно-технологическая схема позволяет повысить степень обезвоживания осадков сточных вод газоочисток доменного и агломерационного производств до 18–20 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Станкевич, В.В. Гигиенические аспекты влияния шламо- и хвостохранилища на окружающую среду / В.В. Станкевич, И.В. Каура // Экология и здоровье человека. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов : сб. науч. ст. XII Междунар. науч.-практ. конф. / УкрГНТЦ «Энергосталь». – Х. : Райдер, 2004. – 416 с.
2. Семиноженко, В.П. Промышленные отходы : проблемы и решения : монография / В.П. Семиноженко, Д.В. Стальнский, А.М. Касимов. – Х. : Индустрія, 2011. – 544 с.
3. Шабалин, А.Ф. Использование и очистка сточных вод на предприятиях черной металлургии / А.Ф. Шабалин. – Изд. 3-е. – М. : Металлургия, 1968. – 508 с.
4. Указания и нормы технологического проектирования и технико-экономические показатели энергетического хозяйства предприятий черной металлургии. Металлургические заводы. Том 14 / Министерство черной металлургии СССР. – М. : Главпроект, 1973. – 58 с.
5. Любарский, В.М. Механическое обезвоживание осадков поверхностных природных вод / В.М. Любарский // Водоснабжение и сантехника. – 1986. – № 3. – С 39–43.
6. Кучинский, М.Х. Обезвоживание осадков промышленных сточных вод вакуумфильтрацией / М.Х. Кучинский // Очистка промышленных сточных вод. – М. : ГОСИНТИ, 1963. – С. 3–21.
7. Туровский, И.С. Обработка осадков сточных вод / И.С. Туровский. – М. : Стройиздат, 1988. – 169 с.
8. Малиновская, Т.А. Разделение суспензий в химической промышленности / Т.А. Малиновская, И.А. Кобринский, О.С. Кирсанов. – М. : Химия, 1983. – 264 с.
9. Яковлев, С.В. Обезвоживание осадков сточных вод металлургической промышленности / С.В. Яковлев, В.И. Аксенов, Л.С. Волков. – М. : Стройиздат, 1984. – 97 с.
10. Ребиндер, П.А. Общий курс коллоидной химии / П.А. Ребиндер. – М. : Высшая школа, 1960. – 246 с.
11. Ломтадзе, В.Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств песчаных и глинистых грунтов / В.Д. Ломтадзе. – М. : Госиздательство геологической литературы, 1952. – 215 с.
12. Пат. № 61999. Пристрій для визначення коефіцієнта фільтрації осадів С02F 11/00, С02F 11/12 Атаманюк О.А., Назаренко М.П., Омельчак А.Г. ; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15.
13. Пат. № 60135. Способ зневоднення осадів С02F 11/12 / Атаманюк О.А., Сидоренко О.П., Назаренко М.П. ; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 11.
14. Патент № 62010. Устаткування для зневоднення осадів стічних промислових та комунальних вод С02F 11/00, С02F 11/12 Атаманюк О.А., Сидоренко О.П., Назаренко М.П. ; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15.

Поступила в редакцию 10.12.12

Описано спосіб дослідження фільтраційних властивостей осадів, які утворені зваженими частками, що входять до складу виробничих стічних вод. Приведено пристрій лабораторної установки. Описано методику проведення експериментів. Прапонований спосіб дозволяє визначати оптимальні параметри процесу фільтрації під впливом постійного електричного струму залежно від впливу змінних чинників. Спосіб застосувався для експериментальних досліджень щодо інтенсифікації гравітаційного зневоднення металургійних шламів на комбінаті «Запоріжсталь». Отримані дані використовуються при проектуванні та експлуатації споруд для зневоднення й утилізації осадів виробничих стічних вод.

Method for studying filtration properties of sediment formed by suspended particles of industrial wastewaters is described. Arrangement of the laboratory plant and methodology for conducting the experiments are presented. The proposed method enables determining optimal parameters of the filtration process under influence of flow of direct current depending on impact of variable factors. The method, in question, was applied for experimental studies on intensification of gravitational dewatering of metallurgical sludge at Iron & Steel Works «Zaporizhstal». The received data can be used in designing and operating of plants for neutralization and disposal of industrial wastewaters sediment.