

**Надутый В.П.**

д.т.н., профессор

Сухарев В.В.

к.т.н., ст. науч. сотр.

Костыря С.В.

мл. науч. сотр.

**Институт
геотехнической механики
им. Н.С. Полякова
НАН Украины**

Nadutyu V.**Sukharev V.****Kostyrya S.**

**M. S. Polyakov Institute of
Geotechnical Mechanics of
the NAS of Ukraine**

УДК 622/794:621-1/-9

АНАЛИЗ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА И ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПЛЕКСНОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ЗОЛЫ- УНОСА ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЕЙ НА ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

В статье изложена проблема накопления золы в отвалах при сжигании углей на теплоэлектростанциях, материалы исследования минерального состава золы, а также обоснование эффективности безотходной комплексной переработки отвалов. Проведен количественный анализ проб золы из отвалов ТЭС, выявлено процентное содержание железа, углерода и силикатной части во всех пробах. Предложен комплексный метод безотходной переработки отвальной и суточной золы-уноса. Представлены результаты обезвоживания отвальной золы на вибрационном устройстве с использованием электрокинетического метода.

Ключевые слова: *вибрационное устройство, электроосмос, обезвоживание, комплексный метод, зола-уноса, безотходная переработка отвалов, углерод, техногенные месторождения.*

Введение. В настоящее время наблюдается устойчивый рост накопления золошлаковых материалов (ЗШМ) в отвалах угольных электростанций: ежегодное образование (ЗШО) в Украине составляет 1,127 млн. т., а объем накопленных ЗШМ в отвалах СНГ составляет более 2,5 млрд. тонн.

Существующие отвалы уже перегружены, имеют большие площади и требуют значительных эксплуатационных затрат, влияющих на повышение себестоимости производства электроэнергии. Накопленные отвалы представляют собой серьезную угрозу для окружающей среды, поскольку громадные объемы пыли в сухую погоду и фильтрация золоотвалов во влажное время года являются потенциальными источниками опасности для здоровья населения региона, наносят значительный вред растительному и животному миру [1-3].

Цель работы. Изучение состава, разработка технологии и подбор необходимого оборудования для комплексной переработки золоотвалов для получения низкозольной углеродной части с последующим использованием ее в качестве твердого топлива на ТЭС, а также силикатной части, пригодной для применения в строительстве. Такой подход позволит решить комплекс задач

социального, экономического и экологического характера, значительно сохранить природные ресурсы и сохранить дефицит строительных материалов.

Целесообразность технологической и экономической утилизации золы-уноса ТЭС вытекает из ее огромных запасов, сложного химического состава и привлекательных для использования физических свойств. Для учета всех этих особенностей потребовалось выполнение комплекса исследований и определенного менеджмента по определению потребителей конечной продукции комплексной переработки золы-уноса. Необходимость комплексного метода переработки золы вытекает из результатов выполненных исследований, которые показали ее сложный элементный состав. В зависимости от марок сжигаемых улей и вмещающих их пород в золе установлено высокое содержание оксида кремния (до 60 %), остаточная масса углеродной части, так называемы «недожог» (составляет 20÷30%), окислы железа (причем их магнитовосприимчивые разновидности составляют от 7% до 20%), окислы алюминия (содержатся в пределах от 10% до 24%).

Таким образом, отходы продуктов горения ТЭС являются техногенными



месторождениями, представляющие промышленный интерес и требующими комплексной технологии в каждом конкретном случае в зависимости от марок сжигаемых углей [4, 5].

Анализ предварительных исследований показал, что технология комплексной переработки свежей и отвальной золы-уноса имеют отличия, поскольку отвальная зола – это слежавшаяся порода, требующая предварительной подготовки для переработки (измельчение и обезвоживание). Однако они могут быть объединены в одном участке с использованием стандартного оборудования и разделены грузопотоками. Объединяющим фактором является идентичность конечных продуктов переработки [6-8].

Таким образом, выполненные исследования продуктов сжигания углей на ТЭС в виде свежей и отвальной золы-уноса показали перспективность ее комплексной безотходной технологии переработки, продукты которой представляют промышленный интерес. Процесс переработки технологически возможен, экономически целесообразен и социально обусловлен.

Основные исследования были направлены на совершенствование используемого оборудования и на разработку технологии извлечения полезных компонентов из золы-уноса (углерода, железа и силиката) по безотходной технологии. Эффективность такого решения очень высока. Достаточно отметить, что только возврат извлеченной из золы до 20% углеродной массы, при суточном потреблении на ТЭС около тысяч тонн, позволяет сокращать количество покупаемого угля и транспортные расходы на его доставку на станции. Учитывая, что продукты комплексной переработки имеют мелкодисперсную фракцию, удобную для дальнейшего использования, это исключает дорогостоящие операции подготовки сырья.

В процессе исследования [9] выполнен анализ золы – суточной и отвальной, с последующим рассевом исходных проб на шесть классов крупности, в каждом из которых определялось содержание в золе силикатной части и содержание сростков железа после выгорания углерода. Результаты этих исследований для сухой суточной золы-уноса представлены в таблице 1.

Таблица 1

Весовой выход сростков железа и гранулометрический состав суточной (сухой) золы-уноса

| № образца | Крупность, мм | Зольность, % | Выход сростков железа, % | Гранулометрический состав, % |
|-----------|-------------------|--------------|--------------------------|------------------------------|
| 1 | Исходный материал | 93,26 | 33,3 | 100 |
| 2 | -5,0+1,0 | 97,47 | 18,7 | 14,0 |
| 3 | -1,0+0,63 | 98,78 | 23,8 | 61,5 |
| 4 | -0,63+0,25 | 95,02 | 37,5 | 16,5 |
| 5 | -0,25+0,1 | 68,52 | 59,4 | 4,5 |
| 6 | -0,1+0,05 | 40,55 | 78,2 | 2,0 |
| 7 | -0,05 | 64,25 | 87,6 | 1,5 |

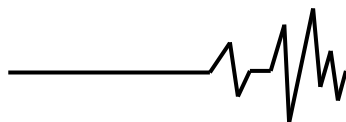
Анализируя полученные результаты видно, что остатки несгоревшего углерода и сростки железа в исследуемой золе распределены не равномерно.

Наиболее высокое содержание углерода находится в классах крупности начиная с 0,25 мм (или 250 микрон) и до 0,05 мм (50 микрон) включительно. Однако суммарная доля этих классов от веса пробы составляет около 8 % (4,5+2+1,5).

В этих же классах крупности наиболее высокое содержание железа, т.е. эти классы крупности являются весьма перспективными.

Так как зола транспортируется в отвал в виде пульпы и при этом происходит разделение пульпы, следовательно более тяжелые частички (силикатная часть и сростки железа) находятся в близкой зоне от места сброса, а углеродная часть отнесена к периферии золохранилища. Из-за неоднородности твердого осадка отвальной золы потребовалось взять пробы в разных точках отвала.

Каждая из проб, отобранных в шести контрольных точках, рассеивались на узкие классы крупности. Определение зольности для этих классов приведено в таблице 2.



Таблиця 2

Зольність отвальної золи-уноса

| Крупність, мм | Зольність, % | | | | | |
|------------------|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Проба 1 | Проба 2 | Проба 3 | Проба 4 | Проба 5 | Проба 6 |
| -0,63+0,25 | - | - | - | - | - | 32,03 |
| -0,25+0,1 | 38,7 | 48,54 | 72,46 | 83,54 | - | 50,21 |
| -0,1+0,05 | 50,0 | 55,73 | 78,21 | 87,19 | 76,53 | 60,61 |
| -0,05 | 79,9 | 83,95 | 89,2 | 90,29 | 87,7 | 81,8 |

Аналізуючи результати досліджень зольності золи (таблиця 2) видно, що високе вміст вуглеводної частини міститься в усіх класах крупності всіх проб, однак найбільше високе вміст спостерігається в верхніх класах і закономірно зменшується з зменшенням крупності частинок.

Методом магнітної сепарації в усіх досліджуваних класах крупності по шести пробам було визначено вміст заліза (сростков) в отвальній золі. Результати досліджень представлені в таблиці 3.

Таблиця 3

Вихід магнітної фракції (сростков заліза) в отвальній золі-уноса

| Крупність, мм | Сростки заліза, % | | | | | |
|------------------|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Проба 1 | Проба 2 | Проба 3 | Проба 4 | Проба 5 | Проба 6 |
| -0,63+0,25 | - | - | - | - | - | 50 |
| -0,25+0,1 | 89 | 89 | 83 | 82 | - | 68 |
| -0,1+0,05 | 90 | 86 | 87 | 82 | 77 | 75 |
| -0,05 | 95 | 96 | 95 | 89 | 83 | 89 |

Результати магнітної сепарації свідчать про те, що в усіх класах крупності по шести пробам силікатна частина отвальної золи-уноса в більшій частині представлена сростками заліза. Це вказує на те, що для зменшення зольності в отвальній золі необхідно використовувати додаткові технологічні операції.

Таким чином, попередні дослідження показали складний мінералогічний склад суточної і отвальної золи-уноса, які складаються з неспаленого вуглецю, сростков заліза і силікатної частини, мають промисловий інтерес і вимагають додаткового дослідження для комплексної переробки.

Відносно черговості і складності комплексної переробки отвальної золи слід врахувати той факт, що вона за багато років накоплення в отвалах злягалася і її необхідно дробити і обезводжувати.

Основний матеріал. В основу рішення проблем з підвищеною вологістю в горній масі лягли дослідження в області вібраційних технологій, якими цікавилися вчені Потураєв В.Н., Франчук В.П., Непомнящий Е.А. і др. [10, 11]. В області досліджень механічного процесу обезводження тонкодисперсної горній масі під впливом перепаду тисків цікавилися вчені Полулях А.Д., Пирогов Г.С., Коткин А.М. і др. [12, 13].

На основі досліджень в області обезводження горній маси вібраційним і вакуумним методами в Інституті геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України авторами розроблено пристрій (див. рис. 1), який дозволяє виконувати комплексне обезводження горній маси, оскільки в ньому одночасно використовуються три механізми обезводження (вібраційний, вакуумний і електрокінетичний) [14]. При цьому вібраційний метод дозволяє ефективно відбирати з горній маси зовнішню воду, вакуумний спосіб прискорює цей процес і додатково обезводжує порові канали в горній масі, а також видаляє перебіжки вологи між частинками. Використання електроосмосу дозволяє частково вилучати капілярну вологу, т. к. іншими механічними способами видалити її складно.

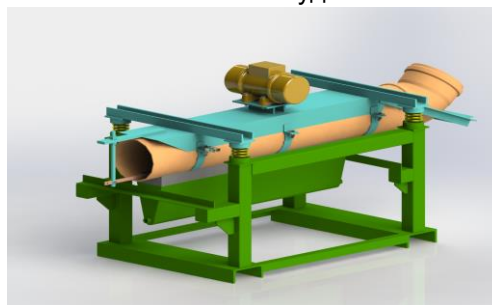


Рис. 1 Загальний вигляд обезводжуючого пристрою



Предварительные исследования работы обезвоживающего устройства с влажной горной массой показали, что режимные и конструктивные параметры оказывают различное влияние на процесс обезвоживания и на конечную влажность отвальной золы-уноса.

Для дальнейшего исследования процесса обезвоживания золы был проведен комплекс экспериментальных исследований по установлению влияния отдельных параметров устройства на основной его показатель – конечную влажность ($W_{\text{кон}}, \%$). При проведении экспериментов была использована измельченная отвальная зола. Результаты экспериментов представлены на рисунках 2 и 3. Варьируемыми параметрами в ходе серии экспериментальных исследований были

следующие:

- площадь поверхности обезвоживания ($S, \text{м}^2$);
- частота вращения вала вибровозбудителя ($\omega, \text{об/мин}$);
- возмущающая сила вибровозбудителя ($F, \text{кН}$);
- давление в вакуумной камере ($P, \text{МПа}$);
- напряжение электропроводящего стержня ($U, \text{В}$).

Снижение давления в вакуумной камере (рис. 2,а) позволяет отобрать из материала свободную влагу. С помощью электрокинетического метода (рис.2,б) происходит воздействие на капиллярную влагу с дальнейшим ее извлечением.

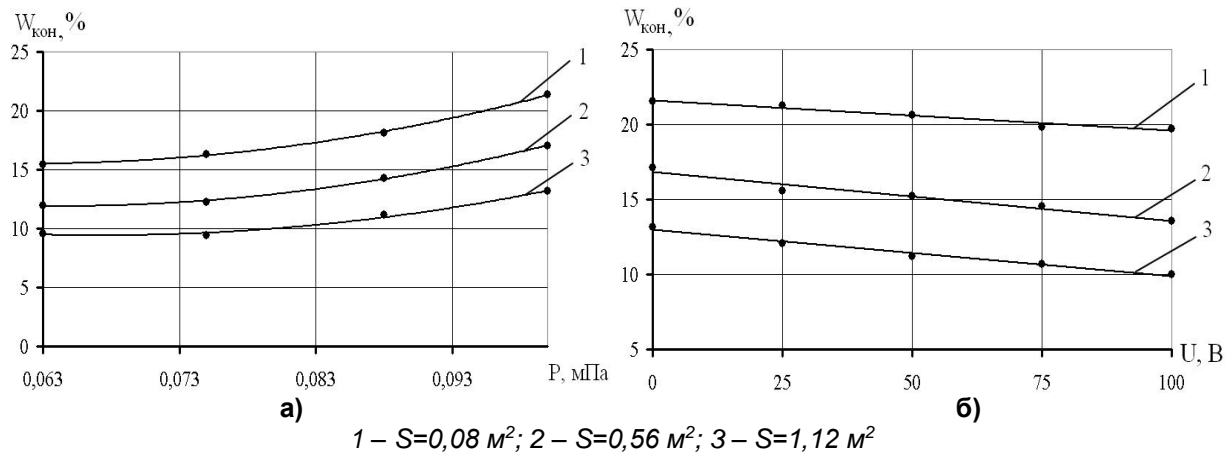


Рис. 2. Зависимость изменения конечной влажности золы-уноса от:
а) разрежения в вакуумной камере, б) напряжения на электроде

При увеличении, в исследуемых пределах, частоты вращения вала вибровозбудителя (рис. 3, а) происходит усиление сегрегации материала в слое и происходит разрыв связей жидкости (так называемых перетяжек) между частицами.

Увеличение возмущающего усилия (рис. 3, б) пагубно влияет на процесс обезвоживания, так как приводит к сильному подбрасыванию уменьшению времени пребывания материала в рабочем органе устройства.

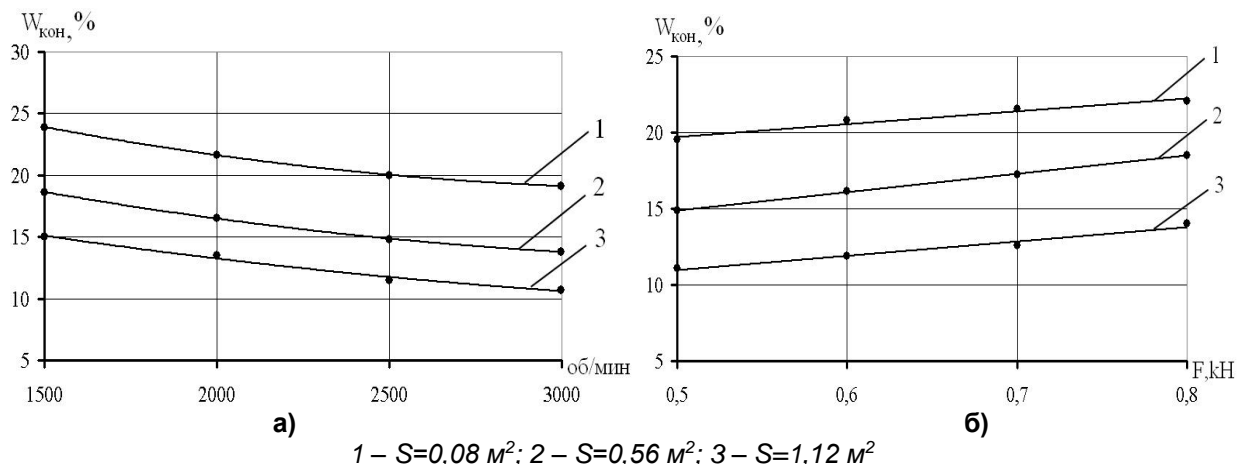


Рис. 3. Зависимость изменения конечной влажности золы-уноса от:
а) частоты вращения вала вибровозбудителя, б) возмущающего усилия



В результате анализа полученных данных видно, что каждый из варьируемых параметров с определенной степенью влияет на обезвоживание золы-уноса.

Выводы. Выполненные исследования суточной и отвальной золы-уноса показали сложный минералогический состав, перспективность ее переработки и промышленный интерес. Безотходная переработка продуктов сжигания ТЭС положительно скажется на экологии и разгрузятся золоохранилища.

Доказана эффективность использования устройства для комплексного обезвоживания измельченной отвальной золы. Установлено влияние некоторых режимных параметров на процесс комплексного обезвоживания: изменение давления в вакуумной камере и напряжения на электродах при создании электроосмоса; изменение частоты колебаний и величина возмущающего усилия.

Список использованных источников

1. Егоров П.А., Березняк А.А. Технология переработки зол тепловых электростанций / Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. // Національний гірничий університет. Дніпропетровськ. – 2007. – Вип. 29(70)-30(31). – С. 224-227.

2. Дрюченко М.М. Разработка и использование высокоэффективной техники и технологии обогащения углей // Уголь Украины. – 1992. – №8, С. 38-40.

3. Назименко Е.И., Гарковенко Е.Е. Интенсификация процессов фильтрации тонкодисперсных угольных шламов импульсными полями // Горный информационно-аналитический бюллетень. Москва. – 2003. – №2. – С.48-50.

4. Бейлин М.И. Теоретические основы процессов обезвоживания углей / М.И. Бейлин. – М.: Недра, 1969. – 238 с.

5. Бочков Ю.Н. Оценка эффективности механических способов обезвоживания угольной мелочи / Ю.Н. Бочков, Л.С. Зарубин // Теория и практика обезвоживания угольной мелочи: Сборник статей. – М.: Наука – 1966. – С. 5-20.

6. Золотко А.А. Ресурсы вторичного топлива в отходах обогащения и возможности его извлечения / А.А. Золотко // Уголь Украины. – 1996. – №12. – С. 36-39.

7. Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых: Учебник для вузов. В 3 т. / А.А. Абрамов. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – Т. II. Технология обогащения полезных ископаемых. – 510 с.

8. Пути интенсификации обезвоживания мелкого угля и отчистки шламовых вод / Каминский В.С. и др. – Т.р. ИОТТ. Проблемы обогащения твердых горючих ископаемых, т. 2. вып. 2. М.: 1973. – С. 3-25

9. Надутый В.П., Севастьянов В.С., Костыря С.В. Обоснование целесообразности комплексной переработки золы уноса теплоэлектростанций / Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць // ІГТМ НАН України. Дніпропетровськ. – 2016. – Вип.131. – С. 59-66.

10. Потураев В.Н. Вибрационная техника и технологии в энергоемких производствах / В.Н. Потураев, В.П. Франчук, В.П. Надутый; НГА Украины. – Днепропетровск, 2002. – 186 с.

11. Непомнящий Е.А. Некоторые результаты теоретического анализа процесса грохочения / Е.А. Непомнящих // Обогащение руд, 1962. – №5. – С. 29-35.

12. Полулях А.Д. Исследование структурных параметров присадки к питанию дисковых вакуум-фильтров / А.Д. Полулях, В.К. Гарус, С.Н. Ходос, А.Е. Гончаренко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн.зб. – 2002. – Вип. 15(56). – С. 116-120.

13. Пирогов Г.С, Коткин А.М., Кейтельгиссер И. Н. Закономерности фильтрования угольных шламов // Уголь Украины. – 1973. – №2 – С. 46-48.

14. Надутый В.П. Результаты комплексного обезвоживания горной массы на вибрационном устройстве / В.П. Надутый, В.В. Сухарев, С.В. Костыря // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – Вінниця, 2014. – Вип. 1(73). – С. 88-93.

Список источников в транслитерации

1. Egorov P.A., Bereznyak A.A. (2007) Tekhnologiya pererabotki zol teplovyh ehlektrostancij [Technology of processing of ashes of thermal power stations]. *Nacional'nij girnichij universitet. Dnipropetrovs'k, 29(70)-30(31)*. 224-227.

2. Dryuchenko M.M. (1992) Razrabotka i ispol'zovanie vysokoehffektivnoj tekhniki i tekhnologii obogashcheniya uglej. [Development and use of highly efficient coal processing technology and technology]. *Ugol' Ukrainy, 8*, 38-40.

3. Nazimenko E.I., Garkovenko E.E. (2003) Intensifikaciya processov fil'tracii tonkodispersnyh ugol'nyh shlamov impul'snymi polyami. [Intensification of filtration processes of fine-dispersed coal slimes by impulse fields]. *Gornij informacionno-analiticheskij byulleten'. Moskva, 2*. 48-50.

4. Bejlin M.I. (1969) Teoreticheskie osnovy processov obezvozhvaniya uglej [Theoretical



bases of processes of dehydration of coals]. *Nedra*.

5. Bochkov YU.N. (1966) Ocenka ehffektivnosti mekhanicheskikh sposobov obezvozhivaniya ugol'noj melochi [Evaluation of the effectiveness of mechanical methods of dehydration of coal fines]. *Teoriya i praktika obezvozhivaniya ugol'noj melochi: Sbornik statej, Nauka*. 5–20.

6. Zolotko A.A. (1996) Resursy vtorichnogo topliva v othodah obogashcheniya i vozmozhnosti ego izvlecheniya [Resources of secondary fuel in wastes of enrichment and the possibility of extracting it] *Ugol' Ukrainy*, 12. 36-39.

7. Abramov A.A. (2004) Pererabotka, obogashchenie i kompleksnoe ispol'zovanie tverdyh poleznyh iskopaemyh: Uchebnik dlya vuzov. V 3 t. [Processing, enrichment and integrated use of solid minerals]. *Moskva: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, Tekhnologiya obogashcheniya poleznyh iskopaemyh*.

8. Kaminskij V.S. (1973) Puti intensivatsii obezvozhivaniya melkogo uglya i otchistki shlamovyh vod / i dr. – T.r. IOTT. Problemy obogashcheniya tverdyh goryuchih iskopaemyh. [Ways of intensification of dehydration of fine coal and cleaning of slime waters]. *Moskva*, 2. 3-25

9. Nadutyj V.P., Sevast'yanov V.S., Kostyrya S.V. (2016) Obosnovanie celesoobraznosti kompleksnoj pererabotki zoly unosy teploehlektrostantsij. [Substantiation of expediency of complex processing of fly ash from power plants]. *Geotekhnichna mekhanika: Mizhvid. zb. nauk. prac' // IGTM NAN Ukraini. Dnipropetrovs'k*, 131. 59-66.

10. Poturaev V.N., Franchuk V.P., Nadutyj V.P. (2002) Nekotorye rezul'taty teoreticheskogo analiza processa grohocheniya [Vibration technology and technology in energy-intensive industries]. *NGA Ukrainy.- Dnepropetrovsk*. 186.

11. Nepomnyashchij E.A. (1962) Nekotorye rezul'taty teoreticheskogo analiza processa grohocheniya [Some results of the theoretical analysis of the screening process] *Obogashchenie rud*, 5, 29-35.

12. Polulyah A.D., Garus V.K., Hodos S.N., Goncharenko A.E. (2002) Issledovanie strukturnykh parametrov prisadki k pitaniyu diskovyh vakuum-fil'trov [Investigation of the structural parameters of the additive for feeding disk vacuum filters] *Zbagachennya korisnih kopalyn: nauk.-tekhn.zb.*, 15, 116-120.

13. Pirogov G.S, Kotkin A.M., Keitel'gisser I.N. (1973) Zakonomernosti fil'trovaniya ugol'nyh shlamov [Regularities of filtering of coal slimes] *Ugol' Ukrainy*, 2. 46-48.

14. Nadutyj V.P., Suharev V.V., Kostyrya S.V. (2014) Rezul'taty kompleksnogo obezvozhivaniya gornoj massy na vibracionnom ustrojstve [Results of complex dewatering of rock mass on a vibrating device]. *Vibracii v tekhnici ta tekhnologiyah: Vseukr. nauk.-tekhn. zhurnal, Vinnicya*, 73. 88-93.

АНАЛІЗ МІНЕРАЛЬНОГО СКЛАДУ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ КОМПЛЕКСНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ЗОЛИ- ВІДНЕСЕННЯ ПРИ СПАЛЮВАННІ ВУГІЛЛЯ НА ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ

У статті викладена проблема нагромадження золи у відвалах при спалюванні вугілля на теплоелектростанціях, матеріали дослідження мінерального складу золи, а також обґрунтування ефективності безвідхідної комплексної переробки відвалів. Проведено кількісний аналіз проб золи з відвалів ТЕС, виявлено процентний вміст заліза, вуглецю і силікатної частини у всіх пробах. Запропоновано комплексний метод безвідхідної переробки відвальної і добової золи-віднесення. Представлено результати зневоднювання відвальної золи на вібраційному пристрої з використанням електрокінетичного методу.

Ключові слова: вібраційний пристрій, електроосмос, зневоднювання, комплексний метод, зола-віднесення, безвідхідна переробка відвалів, вугілля, техногенні родовища.

ANALYSIS OF MINERAL COMPOSITION AND EFFICIENCY OF COMPLEX DRAINING OF FLY ASH IN COMBUSTION OF COALS ON ELECTRIC POWER STATIONS

The article outlines the problem of ash accumulation in dumps during the combustion of coals at thermal power plants, materials for studying the mineral composition of ash, and also the rationale for the efficiency of a non-waste complex processing of dumps. The quantitative analysis of ash samples from the TPP dumps was carried out, the percentage of iron, carbon and silicate part in all samples was revealed. A complex method for non-waste processing of dump and daily fly ash was proposed. The results of dewatering of the dumping ash on a vibrating device using the electrokinetic method are presented.

Keywords: vibration device, electroosmosis, dehydration, complex method, fly ash, waste-free processing of dumps, carbon, technogenic deposits.

**Сведения об авторах**

Надутьий Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАНУ), г. Днепр, Украина.

Сухарев Виталий Витальевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), г. Днепр, Украина.

Костыря Сергей Владимирович – младший научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), г. Днепр, Украина.

Надутьий Володимир Петрович – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу механіки машин і процесів переробки мінеральної сировини, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (ИГТМ НАН України), м. Дніпро, Україна.

Сухарєв Віталій Віталійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу механіки машин і процесів переробки мінеральної сировини, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (ИГТМ НАН України), м. Дніпро, Україна.

Кости́ря Сергі́й Володи́мирович – молодший науковий співробітник відділу механіки машин і процесів переробки мінеральної сировини, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (ИГТМ НАН України), м. Дніпро, Україна.

Nadutyi Vladimir Petrovich – Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, e-mail: nadutyvp@gmail.com.

Sukharev Vitaliy Vitaliyovich – Candidate of Technical Sciences (Rh.D), Senior Researcher in Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, e-mail: agnivik@ukr.net.

Kostyrya Sergey Vladimirovich – Junior Resercher in Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, e-mail: kostyrya81@gmail.com.