

УДК 622.698(01)

В.С. БІЛЕЦЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., Ю.Г. СВІТЛИЙ, канд. техн. наук., доц.
Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

ГІДРАВЛІЧНИЙ ТРАНСПОРТ ВІДХОДІВ ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ

Запропонована методика розрахунку параметрів гідравлічного транспортування відходів вугільної промисловості та теплоенергетики, зокрема, вугільних шламів та золи виносу і шлаку. При цьому в основу розрахунку гідравлічних та технологічних параметрів при проектуванні промислових гідротранспортних систем для видалення відходів флотації вуглезбагачувальних фабрик, золи та шлаків теплових електростанцій, гранульованих шлаків покладено дані експериментальних досліджень, які отримано авторами на пілотних установках з трубопроводами промислових діаметрів, а також в умовах виробництва на хвостопроводах та золошлакопроводах.

Узагальнення, обробка та аналіз експериментальних даних та матеріалів промислових спостережень дали можливість отримати емпіричні залежності для визначення критичних швидкостей та питомих гідравлічних опорів.

В основу розрахунку гідравлічних та технологічних параметрів при проектуванні промислових гідротранспортних систем для видалення відходів флотації вуглезбагачувальних фабрик, золи та шлаків теплових електростанцій, гранульованих шлаків покладено дані експериментальних досліджень, які отримано авторами на пілотних установках з трубопроводами промислових діаметрів, а також в умовах виробництва на хвостопроводах та золошлакопроводах. Запропонована методика розрахунку параметрів гідравлічного транспортування відходів вугільної промисловості та теплоенергетики, зокрема, вугільних шламів та золи виносу і шлаку.

Ключові слова: гідравлічний транспорт, вугільний шлам, відходи ТЕС.

Постановка проблеми і стан її вирішення. Відходи вугільної промисловості - високозольні вугільні шлами та відходи теплоенергетики - зола виносу - багатотоннажні продукти, для передачі яких в межах підприємств використовують промисловий гідравлічний транспорт. У практиці збагачення вугілля шламом називають продукт крупністю 0-0,5 або 0-1 мм.

За даними інституту «Дондіпрошахт» у на підприємствах по переробці вугілля в Україні запаси високозольних забалансових шламів склали 4,86 млн т; відходів флотації зольністю до 70 % - 43,11 млн т [1-4]. Ці шлами частково переробляються на модульних збагачувальних фабриках винесених безпосередньо до муланокочувачів та шламовідстійників, а також на стаціонарних збагачувальних фабриках [5].

Зола-винос утворюється як результат спалювання твердого палива, потім вона вловлюється електрофільтрами і в сухому стані її відбирають за допомогою золовідбірника на виробничі потреби. В іншому випадку вона йде зі шлаком і водою на золовідвал.

При згорянні вугілля на теплових електростанціях в Україні щорічно утворюється 7-9 млн т золи [6]. Питома вага переробки золи в Україні в межах 10 %, тоді як у США цей показник складає 20 %, у Великій Британії - 60 %, у Франції - 72 %, у Фінляндії - 84 %. [7]

Для передачі вказаних обсягів вугільних шламів і золи виносу використовують гідравлічний транспорт [8,9]. Разом з тим, бракує методик розрахунків при проектуванні промислових гідротранспортних систем у гірничій та енергетичній промисловості, які б враховували особливості транспортованих матеріалів - вугільних шламів, шлаків та золи виносу.

Викладення основного матеріалу. В основу розрахунку гідравлічних та технологічних параметрів при проектуванні промислових гідротранспортних систем для видалення відходів флотації вуглезбагачувальних фабрик, золи та шлаків теплових електростанцій, гранульованих шлаків покладено дані експериментальних досліджень, які отримано авторами на пілотних установках з трубопроводами промислових діаметрів, а також в умовах виробництва на хвостопроводах та золошлакопроводах. Узагальнення, обробка та аналіз експериментальних даних та матеріалів промислових спостережень дали можливість отримати емпіричні залежності для визначення критичних швидкостей та питомих гідравлічних опорів.

Основним узагальненим та в певному наближенні універсальним виразом для визначення критичних швидкостей є

$$u_{kp} = K_d \cdot K_S \cdot \sqrt[3]{\rho_S / \rho_o} \cdot \sqrt{gD(1+aS)} \quad (1)$$

Принципово вираз (1) враховує максимально можливу кількість чинників, які впливають на величину критичної швидкості: діаметр трубопроводу D ; густину гідросуміші $(1+aS)$ та об'ємну

дійсну концентрацію S ; густину транспортованого матеріалу ρ_S та середовища, яке переносить його у завислому стані ρ_o , а також середньозважену крупність твердого матеріалу, обумовлюючи дію гравітаційних сил, визначену коефіцієнтом K_d та в'язкісних сил - K_S , що залежать від концентрації дрібнозернистого матеріалу в гідросуміші [10].

Для гідросумішей, складених з дрібнозернистих матеріалів типу золи теплових електростанцій або відходів флотації вираз (1) приймає вигляд

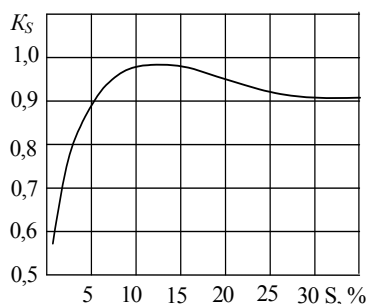
$$u_{kp} = K_S \sqrt{g \cdot D(1 + aS)} \quad (2)$$

Уточнену величину коефіцієнта K_S вибирають з табл. 1 або по графіку, наведеному на рис. 1 залежно від об'ємної концентрації гідросуміші.

Таблиця 1

Величина коефіцієнта K_S .

Об'ємна концентрація гідросуміші S , %	3	5	10	12,5	15	20	25	30	35	40
Коефіцієнт K_S	0,80	0,89	0,98	1,00	0,99	0,96	0,92	0,91	0,91	0,91

Рис. 1. Залежність величини коефіцієнта K_S від об'ємної концентрації гідросуміші

Залежність (2) показує, що при транспортуванні дрібнозернистих матеріалів з максимальною крупністю до 0,8 (1,0) мм гравітаційні сили не мають переважного значення, найдрібніші часточки у суміші з водою створюють середовище підвищеної густини, в якому зависають більш крупні частинки. Тому з виразу (1) виключають параметр $\sqrt[3]{\rho_S/\rho_o}$, а величина K_d наближається до одиниці.

Отже, використання формули (2) для визначення критичної швидкості дає можливість одночасно враховувати комплексну дію на тверді частинки в потоці рідини як гравітаційних сил, так і сил в'язкості.

Для визначення величини коефіцієнта K_d , який залежить від середньозваженої крупності транспортованого матеріалу d_{cep} , використовують різні залежності.

У роботі [11] коефіцієнт K_d запропоновано визначати за допомогою формули

$$K_d = 1,12 + 0,0012d_{cep}^2 \quad (3)$$

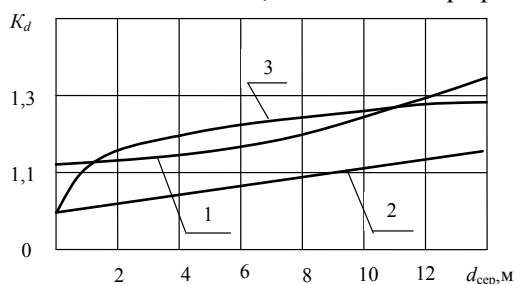
У рекомендаціях до гідравлічного розрахунку систем гідротранспорту золошлакових матеріалів [12], які розроблено на підставі експериментальних матеріалів, отриманих авторами, коефіцієнт K_d , при транспортуванні матеріалу середньозваженою крупністю більше 2 мм визначають за допомогою виразу

$$K_d = 1 + (d_{cep}/D) \quad (4)$$

Аналіз численних дослідних даних щодо параметрів гідравлічного транспортування золошлакових гідросумішей від спалювання різного вугілля, який виконано останнім часом, свідчить про те, що інтенсивність зростання коефіцієнта K_d , залежно від середньозваженої крупності декілька знижується при $d_{cep}=2-3$ мм, а залежність для визначення його може бути записаною у такому вигляді

$$K_d = 1 + 0,12d_{cep}^{0,33} \quad (5)$$

Порівняння величин коефіцієнтів K_d , отриманих шляхом розрахунку за допомогою наведених вище залежностей, наведено на графіку (рис. 2).

Рис. 2. Залежність величини коефіцієнту K_d від середньозваженої крупності транспортованого твердого матеріалу: 1,2,3 - за залежностями (4.71), (4.72), (4.73), відповідно

Оскільки аналіз наведених на графіку даних показує, що в діапазоні зміни середньозваженої крупності від 2 до 14 мм розбіжність між величинами коефіцієнтів K_d , яку розраховано за допомогою залежностей (3) та (5), не перевищує 5 %, при визначенні величини коефіцієнта K_d слід віддавати

перевагу залежності (5). Залежність (4) може бути використаною при розрахунку критичної швидкості транспортування відносно легких золошлакових матеріалів. Запропонована узагальнена залежність для визначення критичної швидкості потоків, які переносять тверді частинки у завислому стані, при необхідності може бути скоригованою у плані уточнення значень коефіцієнтів K_d та K_s при збереженні основної структури формули на підставі даних контрольного експерименту.

Питомі гідравлічні опори при гідравлічному транспортуванні відходів флотації вугілля та дрібнозернистої золи теплових електростанцій визначають за допомогою формули

$$i_{cm} = \lambda_{cm} \cdot (u^2 / 2gD), \quad (6)$$

де λ_{cm} - коефіцієнт гідравлічного опору тертя при течії гідросуміші, які відповідають тому або іншому стану внутрішньої поверхні труб. Число Рейнольдса в цих формулах визначають за залежністю

$$Re_{cm} = uD / \nu_o K_{vd}, \quad (7)$$

де ν_o - коефіцієнт кінематичної в'язкості води при температурі експлуатації гідротранспортної системи; K_{vd} - дослідний комплексний коефіцієнт, який залежить від співвідношення середньозваженого діаметра матеріалу, який транспортують, та об'ємної концентрації гідросуміші.

Величини коефіцієнта K_{vd} наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів K_{vd}									
$S, \% d_{cp}$	3	5	10	15	20	25	30	35	40
0,05	1,2	1,4	2,8	4,8	7,2	10,2	14,4	19,2	25,4
0,10	1,3	1,6	3,2	5,4	8,0	11,2	15,6	20,8	27,4
0,15	1,5	1,8	3,6	5,8	8,8	12,2	16,8	22,6	28,3
0,20	1,6	2,1	4,0	6,6	11,8	14,2	19,4	26,0	34,0
0,25	2,0	3,0	5,6	8,6	12,6	17,8	24,4	32,4	–
0,30	2,6	3,8	7,6	12,4	18,4	27,8	–	–	–

Представлені табличні дані свідчать про те, що величина $\nu_o K_{vd}$, яка чисельно дорівнює коефіцієнту умовної кінематичної в'язкості гідросуміші ν_{cm} , може суттєво впливати на величину числа Рейнольдса Re_{cm} та відповідно на коефіцієнт гідравлічного опору тертя.

Збільшення коефіцієнту умовної кінематичної в'язкості особливо за умов високих об'ємних концентрацій гідросуміші призводить до зменшення величини числа Рейнольдса та збільшення величини коефіцієнта гідравлічного опору тертя λ_{cm} по залежності, наданій на рис 3.

Рис. 3. Залежність коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса



Виходячи з викладеного, вибір найпридатнішого режиму транспортування твердих дрібнозернистих матеріалів типу золи або відходів флотації має здійснюватися на підставі порівняння різних варіантів за об'ємною концентрацією гідросуміші, діаметром трубопроводу та швидкістю транспортування.

Для розрахунку питомих гідравлічних опорів при транспортуванні золошлаків та інших подібних до них твердих матеріалів використовують дво-членну залежність, перший член якої являє собою питомі гідравлічні опори при течії води, розрахований за формулами, відповідними до того чи іншого стану внутрішньої поверхні трубопроводу, а другий - характеризує прирощення питомих втрат напору (додаткові гідравлічні опори), обумовлене введенням твердого матеріалу в напірний потік.

Додаткові питомі гідравлічні опори визначають за формулою Доуда Т.Дж. [13]

$$\Delta i = \frac{S}{2gD} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_s}{\rho_o}} \cdot \sqrt{\frac{u_{kp}}{u}} \cdot K_{dD}, \quad (8)$$

де K_{dD} - дослідний коефіцієнт, який залежить від співвідношення середньозваженого діаметра матеріалу, який транспортують, та діаметра трубопроводу (табл. 3).

Таблиця 3

Значення коефіцієнта K_{dD}									
Співвідношення $d_{ср}/D \cdot 10^2$	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8
Коефіцієнт K_{dD}	0,16	0,28	0,40	0,49	0,57	0,62	0,65	0,67	0,68

Зацікавленість міжнародної спільноти гідравлічним транспортом вугілля, вуглевмісних матеріалів, відходів ТЕС підтверджується рядом сучасних публікацій. [14-19], що показує повернення інтересу до гідротранспорту твердих матеріалів, пік якого припав на 70-80-і роки ХХ ст. Це актуалізує сучасні дослідження.

Висновки. Запропонована методика розрахунку параметрів гідравлічного транспортування відходів вугільної промисловості та теплоенергетики, зокрема, вугільних шламів та золи виносу і шлаку. При цьому в основу розрахунку гідравлічних та технологічних параметрів при проектуванні промислових гідротранспортних систем для видалення відходів флотації вуглезбагачувальних фабрик, золи та шлаків теплових електростанцій, гранульованих шлаків покладено дані експериментальних досліджень, які отримано авторами на пілотних установках з трубопроводами промислових діаметрів, а також в умовах виробництва на хвостопроводах та золошлакопроводах.

Узагальнення, обробка та аналіз експериментальних даних та матеріалів промислових спостережень дали можливість отримати емпіричні залежності для визначення критичних швидкостей та питомих гідравлічних опорів.

Список літератури

1. Нікітін І. М., Сергєєв П. В., Білецький В. С. Селективна флокуляція вугільних шламів латексами / І.М. Нікітін, П.В.Сергєєв, В.С. Білецький. - Донецьк: Східний видавничий дім. - 2001. - 152 с.
2. Полулях А.Д., Сокур А.К. Анализ способов обогащения угольных шламов / А.Д. Полулях, А.К. Сокур // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб., 2012. – Вип. № 49(90). – С. 22-26.
3. Гаркушин Ю. К. Стан та перспективи переробки вугільних шламів / Ю. К. Гаркушин, П. В. Сергєєв, В. С. Білецький // Збагачення корисних копалин. - 2003. - № 17. –С.143–149.
4. Розробки та впровадження технологій промислового використання шламів, поліпшення екологічної ситуації у вугледобувних регіонах та відвернення можливих надзвичайних ситуацій : програма (розроблена на виконання постанови Кабінету Міністрів України від 28.03.97, № 280 „Про хід структури перебудови вугільної промисловості). - К.: Міністерство вугільної промисловості України, 1997. – 31 с.
5. Дослідження збагачення вугільних шламів селективною флокуляцією в умовах гідротранспорту / В.С. Білецький, П. В. Сергєєв, Ю. О. Протасов // Збагачення корисних копалин. – Дніпропетровськ, 2005. – Вип. 23 (64). – С. 119–122.
6. Офіційний сайт Державної служби статистики України [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua>.
7. Ковальський В.П. Використання золи виносу ТЕС у будівельних матеріалах / В. П. Ковальський, О. С. Сідлак // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві – Вінниця, 2014. - Том 16, № 1. - С. 35-40.
8. Світлий Ю.Г., Круть О.А. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів. Донецьк: Східний видавничий дім, 2010. - 268 с.
9. Experimental study of hydraulic transport of large particles in horizontal pipes / F. Ravelet, F. Bakir, S. Khelladi, R. Rey // Volume 45, February 2013, Pages 187–197.
10. Свитлый Ю. Г. Основные элементы расчёта при выборе режима работы из условия обеспечения надёжности гидротранспортных систем топливно-энергетических комплексов / Ю. Г. Свитлый, Ю. Ф. Власов // Материалы Всесоюзной научной конференции. - Тбилиси: Мицниереба, 1974. - С. 405-417.
11. Офенгенден Н. Е. Исследование гидротранспорта водо-угольных суспензий в трубопроводе большого диаметра/ Н. Е. Офенгенден, В. И. Гоштовт, Е. В. Григорюк // Гидравлическая добыча угля. - 1967. - №1.- М. : ЦНИИТЭИугля. - С. 15-19.
12. Рекомендации по гидравлическому расчёту систем гидротранспорта золошлаковых материалов: Пб1–77, ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, УкрНИИГидроуголь. – Ленинград, 1977. – 52 с.
13. Доуд Т. Дж. Обзор трубопроводных систем, построенных в мире за последнее время/ Т. Дж. Доуд// Труды 20-й международной технической конференции по утилизации угля и топливным системам. - США, Клирвотер, 1955. - с. 55-67.
14. Alexander Deml. Entwicklung und Gestaltung der Baulegistik im Tiefbau. Dargestellt am Beispiel des Pipelinebaus. Hamburg: Verlag Dr. Kovac. - 2008. – 368 Seiten.
15. Coal log fuel pipeline transportation system. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www1.eere.energy.gov/inventions/pdfs/uofm-c.pdf>
16. Marrero T.R. Long-Distance Transport of Coal by Coal Log Pipeline [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.p2pays.org/ref/01/00702.pdf>
17. Baha Abulnaga. Slurry Systems Handbook. - McGraw-Hill .2002. – 800 p.
18. Yiyuan Zhao, Thomas S. Lundgren. Characteristics of a freight pipeline transportation system. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:<http://faculty.washington.edu/jbs/itrans/zhao.htm>
19. Canadian Pipeline Transportation System - Transportation Assessment. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.neb.gc.ca/clf-nsi/mrgynfntn/nrgyprpt/trnsprttn/trnsprttnsssmnt2008/trnsprttnsssmnt2008-eng.html>

Рукопис подано до редакції 14.04.16