

Ю.Г. СВІТЛИЙ, канд. техн. наук

(Україна, Донецьк, Науково-виробниче об'єднання "Гаймек"),

В.С. БІЛЕЦЬКИЙ, д-р техн. наук

(Україна, Полтава, Полтавський національний технічний університет),

О.А. КРУТЬ, канд. техн. наук

(Україна, Київ, Інститут вугільних енерготехнологій НАН України)

РІШЕННЯ ПРИКЛАДНИХ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ЗАДАЧ ПРИ ТЕЧІЇ ВИСОКОКОНЦЕНТРОВАНИХ ВОДОВУГІЛЬНИХ СУСПЕНЗІЙ

Постановка проблеми і стан її вирішення. Водовугільні суспензії підвищеної концентрації, при належних седиментаційних та агрегатних характеристиках, призначені для безпосереднього спалювання у топках котлів та інших теплофікаційних установок, мають назву водовугільного палива (ВВП). Найбільш ефективною технологією транспортування цього штучного рідкого палива є гідравлічна по технологічних (внутрішньоцехових) трубопроводах, промислових та магістральних гідротранспортних системах. Оскільки седиментаційна стійкість ВВП виключає необхідність визначення такого параметра як критична швидкість, то основним завданням при проектуванні водовугільних гідротранспортних систем є визначення величини гідравлічного опору, яка характеризує енергоємність процесу та обумовлює вибір засобів транспортування [1-5].

Мета статті позначена в її назві – рішення прикладних гідродинамічних задач при течії висококонцентрованих водовугільних суспензій, які постають при приготуванні і транспортуванні ВВВС.

Виклад основного матеріалу. Відсутність можливості визначення гідравлічних опорів при транспортуванні водовугільного палива на підставі теоретичних положень гідромеханіки обумовлює необхідність застосування для вирішення цього завдання експериментального вимірювання або розрахункового визначення реологічних параметрів суспензії, призначеної до гідравлічного транспортування. ВВВС звичайно відносять до неньютонівських середовищ (рідин), в яких умовна або ефективна в'язкість вже не є величиною, яка залежить лише від температури, а стає функцією швидкості зсуву (градієнту швидкості) та ряду інших чинників.

Існує кілька моделей неньютонівських рідин, кожна з яких з певним ступенем наближення може бути описана своїм характеристичним рівнянням [3-4]. Якщо дисперсна система починає рухатися лише після досягнення певного граничного напруження зсуву (границі текучості), то одномірне реологічне рівняння може бути представлене моделлю Шведова-Бінгама

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \frac{du}{dx}; \tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\epsilon}, \quad (1)$$

де τ_0 – границя текучості або початкове напруження зсуву; τ – прикладене доти-

Загальні питання технології збагачення

чне напруження; η – структурна в'язкість; $\frac{du}{dx} = \dot{\epsilon}$ – градієнт швидкості або швидкість зсуву.

Дисперсні системи, представлені моделлю Шведова-Бінгама, прийнято називати структурованими, пластичними або в'язкопластичними. На практиці подібний режим зустрічаємо при течії висококонцентрованих глинистих, крейдових або водовугільних суспензій без застосування пластифікуючих реагентів.

На відміну від таких дисперсій псевдопластики характеризуються тим, що прикладене до них мале зсувне зусилля викликає рух потоку, а ступінь збільшення напруження зсуву зменшується по мірі збільшення швидкості зсуву. Ці "нелінійні" або "степеневі" рідини описуються реологічними рівняннями, запропонованими Освальдом-Рейнером

$$\tau = k \left(\frac{du}{dx} \right)^n ; \tau = k \cdot \dot{\epsilon}^n , \quad (2)$$

де k – коефіцієнт (індекс) консистентності; n – коефіцієнт (індекс) текучості, або параметр нелінійності.

Якщо $n < 1$, рідина має неньютонівський псевдопластичний характер (т.з. псевдопластик); при $n > 1$ рідина має неньютонівський характер і є дилатантною, та, нарешті, при $n = 1$ течія рідини описується рівнянням Ньютона, яке відображає лінійну залежність між тензором напружень та тензором швидкості деформації

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dx} . \quad (3)$$

У тому випадку, коли дисперсна система має псевдопластичний або дилатантний характер і характеризується границею текучості або початковим напруженням зсуву, рівняння (2) набуває вигляду залежності Гершеля-Балклі

$$\tau = \tau_0 + k \left(\frac{du}{dx} \right)^n ; \tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\epsilon}^n . \quad (4)$$

Розрахунок в'язкості здійснюють за даними реологічних вимірювань $\tau = f(\dot{\epsilon})$ на основі рівнянь Ньютона.

Таким чином, реологічний стан висококонцентрованих водовугільних суспензій може підлягати різним законам та описуватися різними рівняннями.

На практиці навіть незначна зміна властивостей композиційних складових водовугільної суспензії та їх співвідношення можуть призвести до зміни реологічного характеру течії.

Розглянуті положення свідчать про те, що використання результатів реологічних вимірювань або розрахунків за приведеними залежностями з викорис-

Загальні питання технології збагачення

танням коефіцієнтів, визначених шляхом експерименту, для розрахунку параметрів гідротранспорту дисперсних систем можливе лише тоді, коли заздалегідь виконано певний комплекс наукових цілеспрямованих лабораторних досліджень.

При розрахунках необхідно мати на увазі, що для приготовлених із застосуванням пластифікаторів водовугільних суспензій з енергетичної точки зору найбільш прийнятним виявляється транспортування у ламінарному режимі, а криві течії, як правило, віднесені до псевдопластичного типу.

Доцільно звернути увагу на те, що транспортування подібних суспензій при дилатантному й ньютонівському типах течії є небажаним через можливість різкої зміни реологічних характеристик навіть при незначній зміні якісно-кількісного складу суспензії, що в результаті може впливати на стабільність руху та гідравлічні опори.

За цих обставин при використанні даних реологічних досліджень для певного діапазону швидкостей гідравлічні опори можна розрахувати за залежностями

$$i = \frac{4\tau}{D}; \quad (5)$$

а для псевдопластичного типу течії

$$i = \frac{4k\dot{\epsilon}^n}{D}. \quad (6)$$

Окрім розглянутого методу розрахунку гідравлічних опорів при течії високонцентрованих водовугільних суспензій можна використати метод масштабного перерахунку. Суть методу полягає в тому, що на стендових установках, обладнаних, як правило, трубопроводами невеликих діаметрів (модельними трубопроводами), визначають гідравлічні опори та інші параметри при протіканні конкретної дисперсної системи і на основі отриманих даних здійснюють перерахунок на натурні трубопроводи у більшості випадків більшого діаметра.

Масштабний перерахунок здійснюють за допомогою залежності

$$i_n = i_m \cdot \frac{D_m}{D_n}, \quad (8)$$

де індекси "н" та "м" визначають належність параметрів до природи або моделі.

Перевага такого методу перерахунку полягає в тому, що при його застосуванні не слід робити припущень щодо конкретних законів реологічної течії, визначати її реологічні параметри та чинники, які впливають на них, оскільки все це можна визначити одним конкретним вимірюванням. Це, у свою чергу, зумовлює помітне спрощення самого методу перерахунку та суттєве підвищення то-

Загальні питання технології збагачення

чності отриманих результатів.

Для зниження ступеня ризику при розрахунку параметрів та проектуванні гідротранспортної системи і підвищення її надійності при наступній експлуатації доцільно використати комплексний комбінований метод: масштабний перерахунок та реологічні вимірювання.

Навіть незначна неточність у науково-технічному обґрунтуванні створення великих паливно-енергетичних комплексів, що включають магістральний трубопровід, може призвести до підвищеного споживання електроенергії та нестабільності роботи під час експлуатації. Тому доцільно застосовувати метод безпосереднього використання результатів випробувань, отриманих на великомасштабних стендових установках.

Порівняння даних, отриманих при розрахунках гідравлічних опорів з використанням методів реологічних вимірювань, масштабного перерахунку та комплексного методу, наведено в табл. 1.

Порівняння виконано для умов течії по трубопроводу діаметром 102 мм водовугільної суспензії з масовою концентрацією 61%, яку приготовано на основі вугілля марки ДГ зольністю $A^d = 16,2 \%$ при температурі $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таблиця 1

Порівняння величини гідравлічних опорів, які отримано за допомогою різних методів					
Використаний метод	Питомі гідравлічні опори h (м вод. ст./м) при швидкості транспортування (м/с)				
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
Експеримент	0,0228	0,0256	0,0278	0,0296	0,0314
Масштабний перерахунок	0,0212	0,0238	0,0259	0,0275	0,0292
Реологічні вимірювання	0,0206	0,0231	0,0250	0,0267	0,0283

Аналіз наведених у табл. 1 даних показує, що розбіжність величини питомих гідравлічних опорів не перевищує 7-10%, і, таким чином, задовольняє вимогам інженерних розрахунків при проектуванні технологічних та промислових водовугільних гідротранспортних систем.

Метод використання експериментальних даних, отриманих на великомасштабних установках, без будь-якого перерахування має значно меншу похибку, яка складає 3-4%.

Найважливішого значення при розрахунку та виборі оптимальних параметрів гідравлічного транспортування висококонцентрованих водовугільних суспензій набуває швидкість руху по трубопроводу та питомі втрати напору (рис. 1, 2).

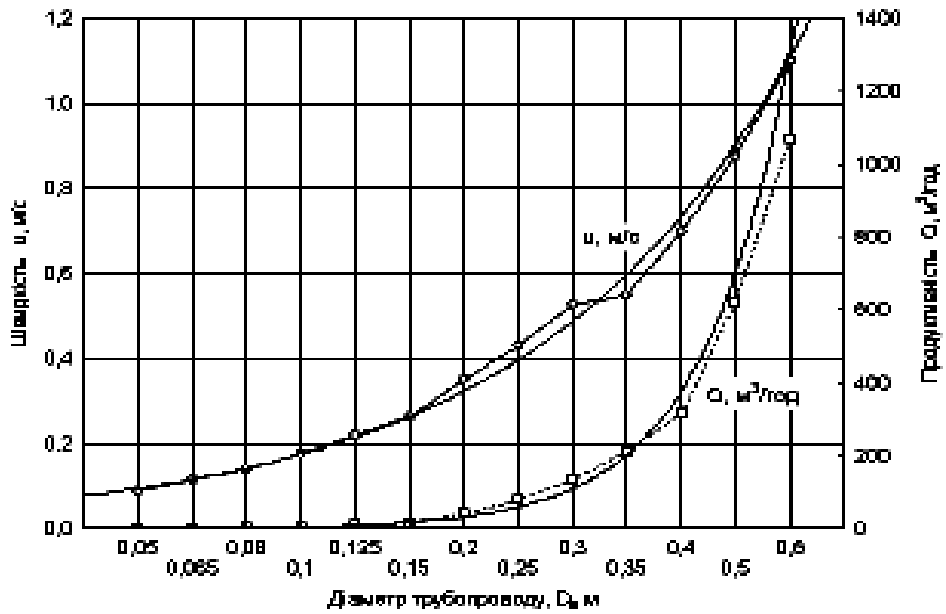


Рис. 1. Рекомендовані середні швидкості u та продуктивності QВВП при транспортуванні водовугільного палива

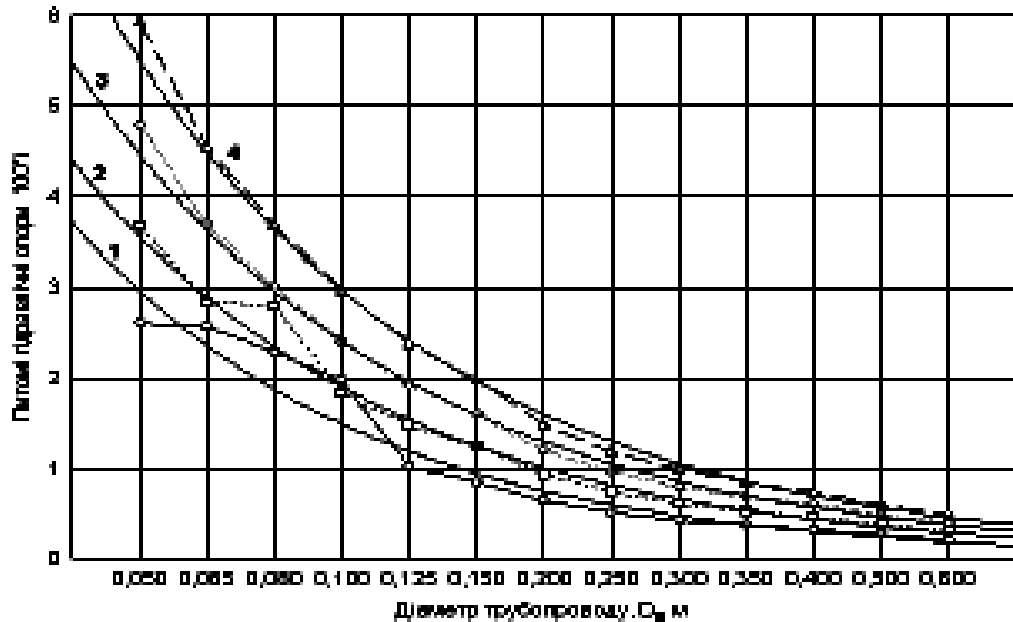


Рис. 2. Питомі втрати опору при транспортуванні водовугільного палива

Водовугільна суспензія, як дуже складна дисперсна система, може в процесі руху під впливом ряду чинників змінювати свої реологічні характеристики, особливо при транспортуванні за допомогою відцентрових насосів. Тому однією з найважливіших характеристик водовугільних суспензій підвищеної концентрації є динамічна стійкість, тобто збереження незмінними при заданому режимі руху дотичних напружень, ефективної в'язкості та агрегативного стану.

Загальні питання технології збагачення

На основі аналізу експериментальних даних було встановлено, що при зміні величини градієнта швидкості в інтервалі від 5 до 22 с⁻¹ дальність та тривалість транспортування суттєво не впливають на величину гідравлічних опорів. Найбільш придатним з точки зору втрат напору та енергоємності процесу є режим транспортування при зміні градієнта швидкості в інтервалі $\dot{\epsilon} = 5-20$ с⁻¹.

При пуску гідротранспортної системи після тривалої зупинки початковий період характеризувався дуже високими гідравлічними опорами. Проте, протягом 10-12 хвилин в умовах експерименту відбувалося зниження гідравлічного опору до початкового рівня, якщо режим не виходив за границі наведеного вище інтервалу зміни градієнта швидкості.

Виходячи з викладеного та наведених вище залежностей, для практичного використання в розрахунках трубопроводів технологічних, промислових (в т.ч. збагачувальні фабрики) та магістральних гідротранспортних систем можна рекомендувати матеріали табл. 2.

Користуючись наведеними в табл. 2 даними, можна виконувати розрахунки ряду технічних та технологічних характеристик. Зокрема, за заданою продуктивністю можна підібрати діаметр трубопроводу, швидкість транспортування водовугільної суспензії та її відповідність допустимому градієнту швидкості. При цьому діаметр труби слід приймати найближчим до розрахункового.

Таблиця 2

Рекомендовані інтервали зміни швидкостей та продуктивності при транспортуванні водовугільної суспензії по трубопроводах гідротранспортних систем

Призначення ГТС	Діаметр трубопроводу D , м	Інтервал швидкостей U , м/с	Інтервал продуктивності Q , м ³ /год
Технологічна	0,050	0,050-0,126	0,35-0,86
	0,065	0,065-0,163	0,78-1,95
	0,080	0,080-0,200	1,45-3,52
	0,100	0,100-0,250	2,83-7,07
	0,125	0,125-0,312	5,32-13,80
Промислова (в т.ч. збагачувальні фабрики)	0,150	0,150-0,375	9,54-23,80
	0,200	0,200-0,500	22,60-56,60
	0,250	0,250-0,620	44,20-109,60
Магістральна	0,300	0,300-0,750	26,40-191,00
	0,350	0,350-0,850	121,00-305,00
	0,400	0,400-1,000	181,00-452,00
	0,500	0,500-1,250	354,00-884,00
	0,600	0,600-1,600	611,00-1527,00

При цьому найбільшу увагу на практиці привертає режим течії з безперервно руйнованою структурою і зменшенням умовної в'язкості при збільшенні швидкості транспортування (режим Шведова-Бінгама).

У турбулентному режимі лінія $i_{см} = f(u)$ при русі суспензії зі збільшенням швидкості відхиляється від такої ж лінії для води. Тому при розрахунку гідравлічних опорів при русі суспензійних середовищ у турбулентному режимі можна

Загальні питання технології збагачення

користуватися деякими положеннями дифузійної теорії зависання твердих частинок, які можуть бути зведеними до такого:

- розподілення твердих частинок по перерізу потоку підлягає імовірнісному закону, що мало відбивається на розподіленні швидкостей;
- мала крупність твердих частинок обумовлює незначну частину роботи зависання в енергетичному балансі потоку;
- рух подібних гідросумішей може уподібнюватися до відповідного руху умовно однорідної рідини з підвищеною порівняно з водою густиною.

В реальних умовах у розрахункові залежності для визначення гідравлічних опорів при транспортуванні вугільних суспензій у турбулентному режимі мають бути введені відповідні коригуючі коефіцієнти.

В остаточному вигляді розрахункові формули можна представити в таких практично однозначних варіантах:

$$i = i_0(1 + C_0 \cdot a \cdot S); \quad (9)$$

$$i = i_0 \cdot \frac{\rho_{см}}{\rho_0} \cdot K; \quad (10)$$

$$i = i_0(1 + aS)^n, \quad (11)$$

де S – об'ємна концентрація суспензії, виражена в частках одиниці; C_0 , K та n – коефіцієнти, які враховують збільшення втрат енергії на турбулентне перемішування вугільної суспензії, яка має залишкові структурні зв'язки та дещо підвищену в'язкість.

Обробка даних, отриманих шляхом експерименту, дала змогу отримати емпіричні залежності для визначення коефіцієнтів у формулах (9)-(11).

$$C_0 = 1 + 10(S - 0,2); \quad (12)$$

$$K = 1 + 1,5(S - 0,2); \quad (13)$$

$$n = 6S. \quad (14)$$

При об'ємних концентраціях менше 20% коефіцієнти C_0 та K приймають рівними 1.

Висновок

Запропонована методика рішення прикладних гідродинамічних задач при течії висококонцентрованих водовугільних суспензій може бути використана в інженерних розрахунках.

Загальні питання технології збагачення

Список літератури

1. Білецький В.С., Круть О.А., Світлий Ю.Г. Рациональне подрібнення вугілля у технології виготовлення водовугільного палива // Зб. наукових праць ДНТУ, сер. Електротехніка та енергетика. – 2008. – Вип. 45 (131). – С. 27-39.

2. Круть А.А., Папаяни Ф.А. Технология приготовления водоугольного топлива с предварительным смешением исходных компонентов // Зб. наук. праць Національної гірничої академії. – 2001. – №3.

3. Круть О.А., Папаяни Ф.О., Козиряцький Л.Н. Підвищення концентрації водовугільного палива при зменшенні енергоємності виготовлення // Зб. наукових праць ДНТУ, сер. Гірничо-електромеханічна. – 2005. – Вип. 101. – С. 154-161.

4. Світлий Ю.Г., Круть О.А. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів: Монографія. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2010. – 268 с.

5. Світлий Ю.Г., Білецький В.С. Гідравлічний транспорт: Монографія. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2009. – 436 с.

© Світлий Ю.Г., Білецький В.С., Круть О.А., 2014

*Надійшла до редколегії 10.09.2014 р.
Рекомендовано до публікації І.К. Младецьким*