

УДК 621.182.95

Математичне моделювання руху концентрованої золівної гідросуміші у структурному режимі

Наведено математичну модель руху концентрованої золівної гідросуміші по круглому трубопроводу постійного перерізу з урахуванням вмісту твердого компонента та граничних умов, що відповідає руху такого середовища у структурному режимі, та числовий розрахунок за нею.

Найважливіша умова для розвитку та функціонування підприємств паливно-енергетичного комплексу – наявність та вартість палива. В умовах скорочення природних запасів газу і нафти вугілля як джерело енергії не втрачає своєї актуальності.

Особливістю використання вугілля є утворення разом з газоподібними і твердих залишків у вигляді золи та шлаків. Для їх видалення як правило застосовують системи гідрозоловидалення, у яких золошлаки транспортуються трубопроводами у вигляді гідросуміші.

Якщо розглядати рух золівної гідросуміші трубопроводом в умовах значних концентрацій (від 40 % і вище за масою), тоді наявність значної кількості твердих частинок впливає на властивості рідини в цілому. В таких середовищах формується просторова структура, їх можна розглядати як однорідні рідини.

Однією з основних теорій структуроутворення в тонкодисперсних системах є гіпотеза, запропонована у працях Н. Б. Ур'єва, В. І. Мурка, Б. В. Юдіна, відповідно до якої

структуроутворення відбувається в гідросумішах за наявності 3 % і більше частинок розміром менш як 10 мкм [1, 2].

Спираючись на літературні дослідження, встановлено, що наявність у пульпі твердої фази спричинює появу початкового напруження зсуву, рух таких середовищ підпорядковується реологічній залежності Шведова-Бінгама [3]

$$\tau = \tau_0 + \mu_{ст} \dot{\gamma},$$

де τ_0 – початкове напруження зсуву, Па;
 $\mu_{ст}$ – структурна в'язкість, Па·с;
 $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, c^{-1} .

Під час експериментальних досліджень, проведених авторами, визначено залежності початкового напруження зсуву τ_0 та структурної в'язкості $\mu_{ст}$ від масового вмісту твердого компонента C [5]:

$$\tau_0 = e^{a+bc^2}, \quad \mu_{ст} = e^{c+d/c},$$

де $a = 5,329$; $b = -15467,224$; $c = 7,242$; $d = -565,433$ – коефіцієнти апроксимації.

Мета статті – удосконалення математичної моделі руху концентрованої золівної гідросуміші в структурному режимі з урахуванням впливу на параметри реологічної моделі масової концентрації матеріалу, що транспортується.

Для складання повноцінної математичної моделі потрібно задати початкові й граничні умови. У загальному випадку граничні умови



Н. Б. ЧЕРНЕЦЬКА-БИЛЕЦЬКА,
 доктор техн. наук
 (Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля)



Д. О. КАПУСТІН,
 аспірант
 (Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля)

визначають нульове значення швидкості на стінці труби $u_{ст} = 0$ та початкове значення швидкості $u = u_0$.

Однак під час руху структурованих гідросумішей до основних додаються ще три специфічні граничні умови: швидкість транспортування має бути не нижчою за швидкість початку осідання частинок; структура в гідросуміші зберігається до значення сумарного напруження від дії сил, що не перевищують силу просторових зв'язків; запропонована математична модель [4] описує поведінку гідросуміші в межах ламінарного режиму.

Відомо, що золошлакові гідросуміші в спокої схильні до швидкого осідання, тому потрібна мінімальна швидкість руху для підтримання твердих частинок у зваженому стані, яку можна ви-

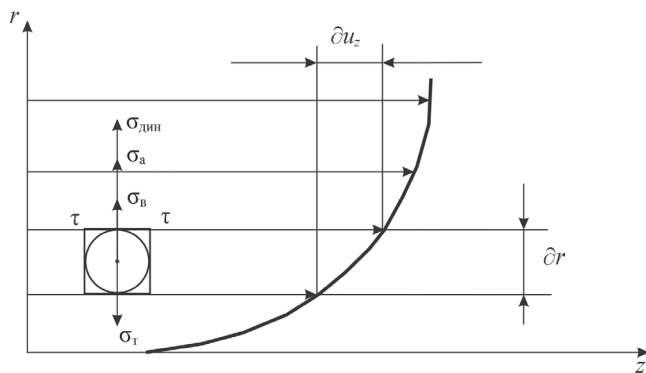


Рис. 1. До визначення критичної швидкості транспортування золової гідросуміші: σ_t , σ_a , $\sigma_{дин}$ і σ_b – напруження від дії сили ваги твердої частинки, Архімеда, динамічних і в’язкісних сил.

значити з балансу напружень від сил, що діють на елементарний кінцевий об’єм середовища з укладеною в нього частинкою (рис. 1).

Після перетворень і виключення членів вищого порядку малості одержимо

$$u_{кр} = \sqrt{\frac{[(\rho_t/\rho_{сум})-1]\pi g D}{8[1+(r_c/D)]} - \frac{\tau_0 D}{2\rho_{сум}r_c[1+(r_c/D)]}}$$

де ρ_t та $\rho_{сум}$ – густина твердої частинки та гідросуміші, кг/м^3 ;
 D – діаметр трубопроводу, м;
 r_c – радіус частинки максимального розміру, м.

За запропонованою залежністю зроблено розрахунок для гідросуміші густиною 1250, 1333, 1428 кг/м^3 і твердим компонентом густиною 2000 кг/м^3 : початкове напруження зсуву τ_0 становило 0,016, 0,4436, 2,9 Па для максимального розміру частинки 800 і 500 мкм, діаметр трубопроводу D змінювався від 50 до 300 мм (рис. 2).

Наведена залежність свідчить, що при малих масовій концентрації твердої частинки і початковому напруженні зсуву основна частка в утриманні частинки належить силі Архімеда та гідродинамічним силам, а у разі значного збільшення τ_0 так само діють і в’язкісні сили, що характеризуються різким зниженням критичної швидкості транспортування при високих масових концентраціях.

При зміні розміру найбільшої частинки від 800 до 500 мкм для гідросуміші з концентрацією 40 % падіння критичної швидкості становило до 0,1 %, для концентрації 50 % – до 4,5 %, а для концентрації 60 % – до 40 %. Різниця збільшується зі збільшенням діаметра трубопроводу.

Порівняльні розрахунки критичної швидкості для досліджуваного матеріалу, запропоновані різними авторами, показано на рис. 3. Аналіз залежностей дає змогу

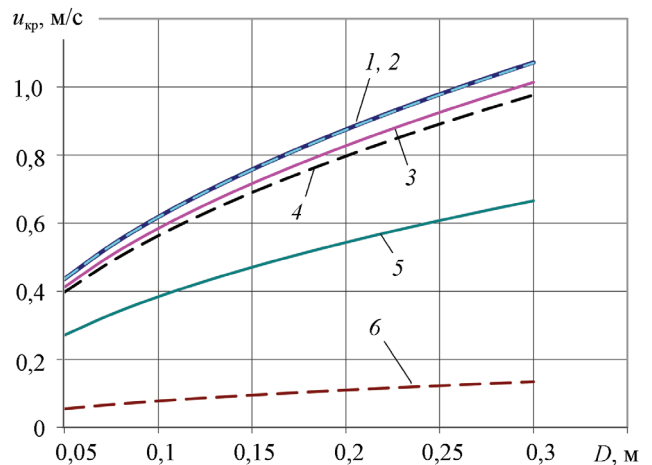


Рис. 2. Залежність критичної швидкості $u_{кр}$ транспортування в структурному режимі від діаметра D трубопроводу: 1, 3 і 5 – для масового вмісту твердої частинки 40, 50 і 60 % при максимальному розмірі частинки 800 мкм; 2, 4 і 6 – для масового вмісту твердої частинки 40, 50 і 60 % при максимальному розмірі частинки 500 мкм.

встановити, що значення критичної швидкості, розраховані за методикою ВНДП [6], значно вищі, ніж для двох інших методик при однаковому діаметрі трубопроводу. Водночас значення критичних швидкостей 4 – 9 зростають зі збільшенням концентрації твердої частинки [6, 7], що суперечить експериментальним даним, за якими спостерігається зниження критичної швидкості транспортування зі збільшенням масової концентрації та густини гідросуміші.

За методикою, запропонованою авторами, критична швидкість знижується зі збільшенням концентрації транспортованого матеріалу, але значно – при масових концентраціях понад 55 %.

Швидкість в умовах руйнування структурних зв’язків можна визначити зі співвідношення сумарного напруження, зумовленого девіатором тензора напружень, і напруження від дії сил структурних зв’язків $\tau_{\Sigma} < \tau_{max}$. Максимальне напруження визначається методом, запропонованим у роботах [1, 2]. У разі сталого ламінарного руху концентрованої золової гідросуміші каналом круглого перерізу девіатор тензора напружень подано за працею [4] (рис. 4).

Тоді між шарами, що рухаються, виникає додаткове напруження $\mu_{ст}(C)(\partial u_z/\partial r)$, а умова збереження структури

$$\mu_{ст}(C)(\partial u_z/\partial r) \leq \tau_{max}$$

Визначимо швидкість, за якою відбувається руйнування структурних зв’язків, для масових концентрацій твердої частинки 40, 50 та 60 %, для середнього діаметра основної частинки 60 мкм, середнього діаметра субмікронної домішки 5 мкм та її вмісту 3 %, при

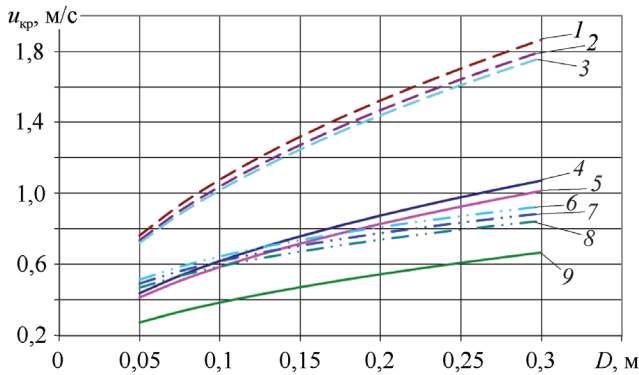


Рис. 3. Залежність критичної швидкості золової гідросуміші $u_{кр}$ від діаметра трубопроводу D , розрахованої за різними методиками: 1, 2 і 3 – для масової концентрації 60, 50 і 40 % [6]; 4, 5 і 9 – для масової концентрації 40, 50 і 60 % (запропоновано авторами); 6, 7 і 8 – для масової концентрації 60, 50 і 40 % [7].

цьому τ_{max} становить 0,024, 0,15, 0,28 Па; товщина шару зсуву дорівнює розміру найбільшої частинки (800 мкм), структурна в'язкість становить 0,016, 0,017, 0,1133 Па, діаметр трубопроводу $D = 50$ мм (рис. 5, крива 1).

Із залежності (див. рис. 5) видно, що у разі теоретичного ламінарного режиму структура гідросуміші зберігається до швидкості 48 м/с ($Re_{e40}=3180000$) при масовій концентрації 40 %, при цьому максимальне значення швидкості 270 м/с ($Re_{e50}=1630000$) спостерігається при масовій концентрації твердого 50 %, після чого відбувається падіння до 80 м/с ($Re_{e60}=47000$) при вмісті твердого 60 %, що пов'язане зі збільшенням значення структурної в'язкості.

Наступною граничною умовою є визначення меж ламінарного режиму під час транспортування таких гідросумішей.

За переміщення частинки перпендикулярно до напрямку руху відповідає підймальна сила, що виникає при обтіканні частинки, або напруження від її дії:

$$\sigma_{дин} = \frac{1}{2} \rho_{сум} \left[2(\dot{\gamma} \Delta r) u_{z1} + (\dot{\gamma} \Delta r)^2 \right],$$

де Δr – розмір грані елементарного об'єму;

u_{z1} – швидкість сусіднього шару.

При товщині шару зсуву Δr , що дорівнює діаметру найбільшої частинки d_q (800 мкм), значення другого члена правої частини в 100 разів менше, ніж першого, і його можна виключити.

Звідси масообмін при течії концентрованої суміші можливий лише у разі перевищення напруження від дії динамічних сил $\sigma_{дин}$ над сумарним напруженням від дії масових $\sigma_{мас} = \sigma_T - \sigma_a$ і в'язкісних σ_B сил: $\sigma_{дин} = \rho_{сум} (\dot{\gamma} r_q) u_{z1} \geq \sigma_{мас} + \sigma_B$ (див. рис. 4).

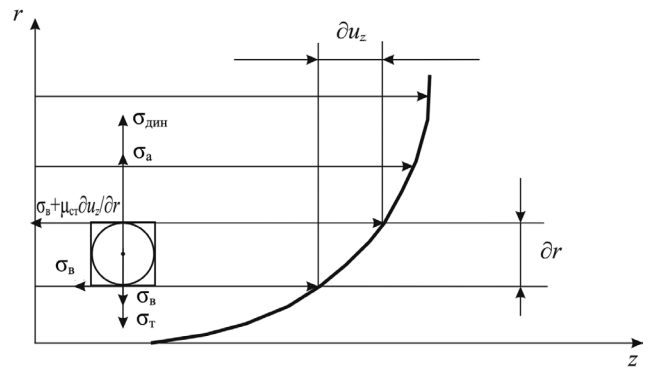


Рис. 4. До визначення швидкості золової гідросуміші в умовах руйнування структури у разі ламінарного режиму руху.

Наведені (див. рис. 5, крива 2) залежності показують, що при збільшенні концентрації твердого компонента різко підвищується швидкість зміни режиму течії за ступеневим законом 24 м/с ($Re_{e40}=1560000$), 54 м/с ($Re_{e50}=320000$), 136 м/с ($Re_{e60}=80000$) відповідно для концентрацій 40, 50 та 60 %.

Моделювання проводилося для гідросумішей з концентрацією твердого 40, 50 та 60 % при густині 1250, 1333 та 1428 $кг/м^3$ відповідно, товщині шару зсуву 800 мкм. Значення початкового напруження зсуву приймалися 0,016, 0,4436 та 2,9 Па, а напруження від структурних сил – 0,024, 0,15 та 0,28 Па.

Перехід до турбулентного режиму відбувається тоді, коли більша частина перерізу трубопроводу охоплена переміщеннями перпендикулярно до швидкості транспортування. При цьому сумарне напруження від дії масових і поверхневих сил має перевищувати напруження від сил структуроутворення: $\rho_{сум} (\dot{\gamma} d_q) u_{z1} - \tau_0 - [(\rho_{ТВ} - \rho_{сум}) \pi d_q g] / 8 \geq \tau_{max}$ (див. рис. 4).

Швидкість переходу до турбулентного режиму змінюється за нелінійним законом, при збільшенні масової концентрації понад 50 % відбувається її різке збільшення (див. рис. 5, крива 3).

За математичною моделлю концентрованої золової гідросуміші з урахуванням граничних і початкових умов, а також проведеними дослідженнями щодо визначення реологічних показників концентрованих відходів ТЕС проведемо математичне моделювання руху такої гідросуміші по круглому трубопроводу постійного перерізу в сталому структурному режимі.

Математичне моделювання проводилося на ЕОМ для концентрованої золової гідросуміші з твердим компонентом густиною ρ_p , що дорівнює 2000 $кг/м^3$ і середнім діаметром $d_{сер} = 60$ мкм, зміст субмікронної домішки становив 3 % і її середній діаметр $d_{сер} = 5$ мкм, максимальний розмір частинки приймався 800 мкм, діаметр трубопроводу D становив 50 мм.

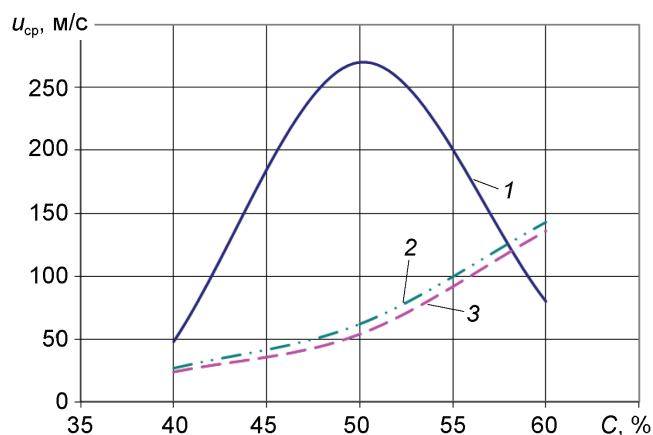


Рис. 5. Залежність середньої швидкості $u_{ср}$ золової гідросуміші від масової концентрації C твердого компонента: 1 – при руйнуванні міжмолекулярної взаємодії у ламінарному режимі; 2 і 3 – в умовах зміни режиму руху структурних гідросумішей на турбулентний і перехідний.

Теоретичні експерименти показують, що при русі гідросуміші в структурному режимі втрати тиску змінюються за близькими до лінійної залежності законами та апроксимуються залежностями $\Delta p_{40} = 755u^{1,39}$, $\Delta p_{50} = 840u^{1,38}$, $\Delta p_{60} = 1000u^{1,51}$, при цьому значення критерію точності апроксимації становить $r^2 = 1$ для всіх залежностей.

Наведені залежності (рис. 6) показують, що зі збільшенням масової концентрації твердого компонента відбувається розширення меж структурного режиму. Це пов'язано зі збільшенням максимального допустимого напруження внаслідок збільшення кількості структурних зв'язків.

Висновки. Математична модель руху концентрованої золової гідросуміші ґрунтується на моделі руху суспензій з урахуванням специфічних граничних умов: критичної швидкості транспортування, швидкостей руйнування структури та зміни режиму руху.

Теоретичні дослідження показали, що при високих концентраціях транспортованого матеріалу і русі в структурному режимі просторова структура зберігається до швидкостей порядку 24 м/с, що відповідає ефективному числу Рейнольдса ($Re_e = 1560000$).

Проведене числове моделювання процесу транспортування золової гідросуміші з масовими концентраціями 40, 50 та 60 % дало змогу встановити близький до лінійного характер зміни втрат напору при досліджуваних концентраціях. Таке поведіння зумовлене локальним руйнуванням структури з ростом швидкості транспортування і ламінаризацією потоку в умовах високого вмісту твердого компонента.

Проведений комплекс досліджень підтвердив можливість використання, в певних межах, математичного

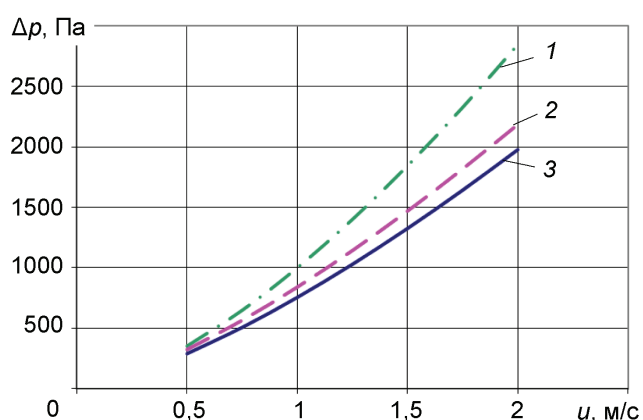


Рис. 6. Залежність втрат напору Δp від швидкості u транспортування для концентрованої золової гідросуміші в структурному режимі вздовж прямолінійної ділянки трубопроводу: 1, 2 і 3 – для масової концентрації 60, 50 і 40 % твердого компонента.

апарату однорідних рідин для визначення показників руху концентрованої золової гідросуміші у структурному режимі, що дало змогу поліпшити розрахунок втрат тиску ще на етапі проектування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Урьев Н. Б. Высококонцентрированные дисперсные системы / Н. Б. Урьев. – М.: Химия, 1980. – 320 с.
2. Мурко В. И. Физико-химические основы формирования структурно-реологических характеристик водоугольных суспензий / В. И. Мурко // Химия и природосберегающие технологии использования угля: тр. междунар. конф., 15 – 17 февраля 1999 г. – Звенигород, 1999. – С. 72 – 74.
3. Транспортирование водоугольных суспензий: гидродинамика и температурный режим / [А. С. Кондратьев, В. М. Овсянников, Е. П. Олофинский и др.]. – М.: Недра, 1988. – 213 с.
4. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Недра, 1978. – 736 с.
5. Капустін Д. О. Реологічні дослідження концентрованих золових гідросумішей / Д. О. Капустін // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – № 3 (174): відп. ред. Н. Б. Чернецька-Білецька. – 2012. – С. 73 – 79.
6. Світлий Ю. Г. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів / Ю. Г. Світлий, О. А. Круть. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2010. – 268 с.
7. Джваршеишвили А. Г. Системы трубопроводного транспорта горно-обогатительных предприятий / А. Г. Джваршеишвили. – М.: Недра, 1981. – 384 с.