

МЕТОДИКА ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ЧАСТКОВО ЗАМУЛЕНОГО ПУЛЬПОПРОВОДУ

Степан Кріль¹, Ірина Скороход², Володимир Фадеїчев³,
Людмила Орлова⁴

Інститут гідромеханіки Національної академії наук України
8/4, вул. Желябова, м. Київ, 03057

¹ доктор техн. наук, професор, igmkril@gmail.com, orcid.org/0000-0002-4300-7312

² канд. фіз.-мат. наук, irasko2016@gmail.com, orcid.org/0000-0001-8628-3715

³ головн. інж.-гідрот., v.fadeichev@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4994-1306

⁴ провідний інж.-математик. luor@i.ua, orcid.org/0000-0002-0194-165X

DOI: 10.32347/2524-0021.2019.31.25-34

Анотація. Розглядається критичний режим транспортування твердих дисперсних матеріалів потоком води у частково замуленому горизонтальному трубопроводі. Характерним для такого режиму гідротранспортування є те, що шар замулення запобігає трубопровод від швидкого зношення і що із збільшенням висоти шару критична швидкість потоку, нижче якої відбувається випадання твердого матеріалу в осад, зменшується, тим часом як гідравлічний опір тертя різко зростає. Одна із важливих задач дослідження критичного режиму руху суспензії при частковому замуленні полягає у розробці науково обґрунтованих методів розрахунку критичної швидкості потоку і питомих втрат напору на тертя. В роботі розроблено узагальнену методику гідравлічного розрахунку частково замулених і, зокрема, незамулених пульпопроводів в основу якої покладено систему двох алгебраїчних рівнянь, що описують критичний режим роботи пульпопроводу. Одне із рівнянь використовується для визначення питомих втрат напору на тертя, а друга – для визначення критичної швидкості, відповідної питомих втрат напору. Також розглядається випадок, коли для незамуленої труби експериментальні чи розрахункові значення критичної швидкості і питомих втрат напору відомі, але їх треба перерахувати для частково замуленої труби. Для даного випадку запропоновано прості розрахункові формули для оперативного перерахунку названих параметрів. Наведено приклади розрахунку.

Ключові слова: трубопровідний гідротранспорт, частково замулений пульпопровід, гідравлічний розрахунок.

СТАН ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Стан і аналіз результатів попередніх досліджень гідротранспорту незв'язних сипких матеріалів по частково замулених напірних трубопроводах описано, зокрема в

[1]. Не вдаючись в подробиці цього аналізу, відмітимо лише найбільш основні моменти.

У бувшому Союзі та за кордоном перші кроки на шляху дослідження гідродинаміки частково замулених пульпопроводів були зроблені в кінці 60-х і на початку 70-

х років минулого століття. В цей період особливу актуальність набувають дослідження, пов'язані з рішенням задач трубопровідного гідротранспорту сипких матеріалів у багатьох галузях промисловості, зокрема, гірничовидобувній і вугільній. На цей час дослідженню частково замулених режимів роботи пульпопроводів присвячена невелика кількість робіт, головним чином експериментальних. Запропоновано емпіричні залежності, що пов'язують питомі втрати напорів на тертя з об'ємного витратою суспензії, площею та конфігурацією живого перерізу потоку. Однак питомі втрати напорів на тертя, обчислені згідно з запропонованими формулами, при однакових умовах гідротранспортування, дають суттєво різні результати з максимальною розбіжністю в 10 і більше разів, не дивлячись на те, що ці формули, згідно з твердженням авторів, одержані на основі експериментальних даних. Адже, якщо експериментальні дані, покладені в основу тієї чи другої формули, достовірні, то область застосування кожної із них повинна мати своє обмеження. Оскільки автори не роблять їх, використання запропонованих формул для практичних розрахунків стає неможливим.

Починаючи з середини 80-х років назріла науково-технічна проблема створення магістральних гідротранспортних систем на основі ефективних технологій, що дозволяють значно підвищити продуктивність цих систем при порівняно низьких енергозатратах. У зв'язку з цим зусилля багатьох науково-дослідних організацій були спрямовані на створення такого роду технологій і розробку методики гідравлічного розрахунку магістральних замулених пульпопроводів з урахуванням технологічних параметрів, підвищуючих ефективність гідротранспорту [2-6]. Відсутність

достатньо обґрунтованих фізичних моделей течії суспензій в трубах привела до того, що в практиці використовувалася велика кількість різних і у більшості своїй емпіричних розрахункових формул. Запропоновані формули із-за своєї обмеженості, а в деяких випадках і неприпустимо низького ступеня точності, далеко не завжди задовольняли вимогам проектування і створення гідротранспортних систем. Лише в кінці 20-го століття Інститутом гідромеханіки НАН України було розроблено науково обґрунтовану напівемпіричну методику розрахунку основних параметрів гідротранспортування [5]. Для перевірки достовірності її використано великий за об'ємом експериментальний матеріал, щодо гідротранспорту, запозичений із усіляких літературних джерел, зокрема [1,2,7,8,9] і одержаний різними авторами. В експериментальних дослідженнях середня крупність твердого матеріалу змінювалася від 0,05 до 16 мм, а густина – від 1530 до 5400 кг/м³, прохідний діаметр труби змінювався у діапазоні 24...1000 мм; об'ємна концентрація суспензії дорівнювала 0,03...0,36. У результаті встановлено, що середнє по усьому експериментальному матеріалу відношенє відхилення розрахункових значень питомих втрат напорів на тертя від експериментальних складає біля 5%, а розрахункових значень критичної швидкості гідротранспортування – біля 6%, що й свідчить про достовірність запропонованої методики розрахунку у широкому діапазоні зміни умов гідротранспортування.

Дану методику розрахунку нижче узагальнено на випадок часткового замулення труб, при цьому розглядається лише критичний режим роботи пульпопроводів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Критичний режим гідротранспортування вважають економічним, оскільки у даному разі питомі втрати напора на тертя мінімальні порівняно з відповідними втратами напора при швидкостях, більших критичної. Однак, при такому режимі транспортування в замулених трубах відбувається інтенсивне стирання нижніх стінок труби твердим матеріалом, основна маса якого переміщується саме по низу труби. Щоби запобігти стиранню нижніх стінок труби, доцільно гідротранспортувати тверді матеріали в частково замулених трубах. У даному випадку невеликий шар нерухомого осаду на дні труби буде відігравати роль підстилки, над якою рухається суспензія, що й запобігатиме прямому контакту рухомих твердих часток з нижніми стінками труби.

По аналогії з [5], в основу методики гідравлічного розрахунку частково замулених труб покладено два рівняння, одне із яких визначає питомі втрати напора на тертя $i_{кр}$, а друге – критичну швидкість потоку $u_{кр}$. Ці рівняння мають відповідно вигляд:

Рівняння для визначення $i_{кр}$:

$$i_{кр} = \frac{K\sigma(\Delta_s-1)1,96S_{max}H_{кр}}{1-a_{кр}}; \quad (1)$$

$$S_{max} = 0,3(2 - n_{0,1}); \quad (2)$$

$$a_{кр} = 2\alpha(0,25 + 0,2\alpha)th(0,714\sqrt{C}); \quad (3)$$

$$\alpha = 0,9\sqrt{Fr_s} \text{ при } \Delta_s \leq 2,84; \quad (4)$$

$$\alpha = 1,22\sqrt{\frac{Fr_s}{\Delta_s-1}} \text{ при } \Delta_s > 2,84. \quad (5)$$

Рівняння для визначення $u_{кр}$:

$$\frac{\Delta_{0,кр}}{(1-a_{кр})\omega_{кр}^2} \frac{\lambda_{кр}}{8} \frac{u^2}{gR} = i_{кр}, \quad (6)$$

$$\Delta_{0,кр} = 1 + (\Delta_s - 1)S_{0,кр}, \quad (7)$$

$$S_{0,кр} = S_{max} \cdot C^m, \quad (8)$$

$$m = 3,32 + 1,735signx_s th(1,36|x_s|^{0,853}), \quad (9)$$

$$x_s = lgRe_s - 1,03, \quad (10)$$

$$\omega_{кр} = \frac{1+1,326\sqrt{\lambda_w}}{1+1,326\sqrt{\lambda_w}\beta}, \quad (11)$$

$$\beta = 1 + a_{кр} + \frac{u_{кр}}{2\sqrt{gR}} \cdot \varphi_0, \quad (12)$$

$$\varphi_0 = \{1 + (0,45 - C)^2[1,92 + 14,9(0,45 - S)^2]\}th(0,82Fr_s^{3/8}). \quad (13)$$

В (1)-(13) використано наступні позначення: K – менший із коефіцієнтів зовнішнього і внутрішнього тертя ковзання зануреного у воду твердого матеріалу; σ – параметр, який враховує зменшення коефіцієнта K при наявності дрібних фракцій діаметром $<0,01$ мм у твердому матеріалі; $\Delta_s = \frac{\rho_s}{\rho}$ – співвідношення густин твердих часток і води; S, C, S_{max} – середня по живому перерізу потоку, нормована і гранично можлива концентрація суспензії, при

цьому $C = \frac{S}{S_{max}}$; $n_{0,1}$ – вміст (у долях одиниці) фракцій діаметром $<0,01$ мм у гранулометричному складі твердого матеріалу; $H_{кр} = H'_{кр}/2R$, де $H'_{кр}$ – товщина висококонцентрованого придонного шару потоку суспензії при критичному режимі гідротранспортування (див. рис.2); R – гідравлічний радіус живого перерізу; $a_{кр}$ – параметр вісьової асиметрії поля осереднених швидкостей суспензії; Fr_s, Re_s – число

Фруда і число Рейнольдса для твердих часток; $\omega_{кр}$ – відношення максимальної осередненої швидкості потоку води до максимальної осередненої швидкості відповідного потоку суспензії при однакових об'ємних витратах; $\lambda_{кр}$, λ_w – гідравлічний коефіцієнт тертя для потоку суспензії і відповідного потоку води; g – прискорення вільного падіння.

Рівняння (1) і (6) одержані теоретично, виходячи із певних фізичних міркувань, а параметри $a_{кр}$, $S_{0,кр}$, $\omega_{кр}$, λ_w , $\lambda_{кр}$, K і $H_{кр}$ одержані у результаті обробки експериментальних даних щодо кінематичної структури потоку, критичної швидкості гідротранспортування та питомих втрат напору на тертя.

Для визначення гідравлічних коефіцієнтів тертя λ_w і $\lambda_{кр}$ рекомендуються наступні формули відповідно

$$\lambda_w = \frac{1}{(1,8lgRe_w - b)^2}; \quad (14)$$

$$\lambda_{кр} = \frac{1}{(1,8lgRe_{кр} - b)^2}; \quad (15)$$

$$Re_w = \frac{u_{кр}D}{\nu_w}, \quad (16)$$

$$Re_{кр} = Re_w \cdot \frac{(1-a_{кр})}{w_{кр}} \cdot \frac{\Delta_{0,кр}}{\psi_{0,кр}}, \quad (17)$$

де D – діаметр труби; b – параметр, який характеризує ступінь відносної еквівалентної шорсткості сталених труб і визначається шляхом гідравлічного випробування труб; $\psi_{0,кр}$ – відношення динамічної в'язкості суспензії, об'ємна концентрація якої дорівнює $S_{0,кр}$, до динамічної в'язкості води [10]:

$$\psi_{0,кр} = \frac{1+1,5S_{0,кр}}{(1-S_{0,кр})^2}. \quad (18)$$

Що стосується визначення величини $H_{кр}$, то у результаті обробки експериментальних даних установлено, що вона залежить від $\frac{d_s}{4R}$ і параметра C . Графічне зображення такої залежності для певних значень C показано на рис. 1.

Для більш широкого діапазону зміни параметра C від 0,05 до 0,75 рисунок, аналогічний рисунку 1, міститься в [5].

Визначимо геометричні характеристики живого перерізу: площу ω , змочений периметр χ і гідравлічний радіус R . Ці характеристики повинні бути виражені через радіус труби r і ступінь замулення $\Delta = \frac{h}{r}$, де h – стрілка сегмента, утвореного висококоцентрованим шаром замулення (рис. 2.)

У даному випадку можемо написати

$$\omega = \omega' r^2; \quad (19)$$

$$\chi = \chi' r; \quad (20)$$

$$R = \frac{\omega' r^2}{\chi' r} = R' r; \quad (21)$$

$$\omega' = \pi - \omega_s; \quad (22)$$

$$\chi' = (2\pi - l_s) + a_s; \quad (23)$$

$$R' = \frac{\pi - \omega_s}{(2\pi - l_s) + a_s}, \quad (24)$$

де ω_s , l_s , a_s – площа, довжина дуги і хорда сегмента для радіуса r , рівного одиниці.

Значення цих параметрів залежно від $\frac{h}{r}$ містяться у довідниках з математики, зокрема в [11]. В якості прикладу в таблиці 1 наведено розрахункові значення характеристик ω' , χ' , R' для заданих $\frac{h}{r} = 0; 0,25; 0,5$ і $0,75$ при $r = 1$.

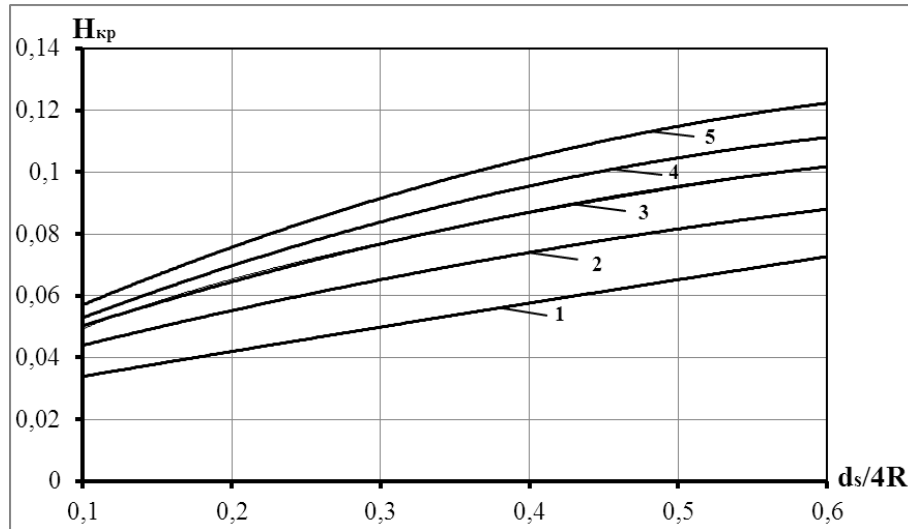


Рис. 1. Залежність $H_{кр}$ від $\frac{d_s}{4R}$ і параметра C . Криві 1,2,3,4,5 стосуються значень $C = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25$ і 0.3 , відповідно

Fig. 1. The dependence $H_{кр}$ of $\frac{d_s}{4R}$ and parameter C . The curves 1,2,3,4,5 relate to the values $C = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25$ і 0.3 respectively

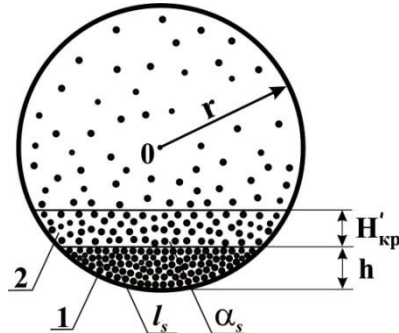


Рис. 2. Схема живого перерізу потоку : 1 – нерухомий шар замулення; 2 – високо-нцентрований придонний шар потоку суспензії

Fig. 2. Scheme of live section of the flow in suspension: 1 – fixed siltation layer; 2 – highly concentrated bottom layer of suspension flow

Таблиця 1. Геометричні характеристики живого перерізу для заданих значень $\frac{h}{r}$
Table 1. Geometric characteristics of live section for given values $\frac{h}{r}$

$\Delta = \frac{h}{r}$	$\omega' = \frac{\omega}{r^2}$	$\chi' = \frac{\chi}{r}$	$R' = \frac{R}{r}$
0	3,140	6,280	0,500
0,25	2,912	6,156	0,473
0,5	2,526	5,958	0,424
0,75	2,065	5,581	0,370

Підставивши знайдені значення ω' , χ' і R' в (18), (20) і (21), відповідно, знаходимо ω , χ і R для довільного радіуса r .

Описана вище узагальнена методика розрахунку стосується як замуленого, так і частково замуленого пульпопроводів. Однак, в інженерній практиці бувають випадки, коли для замуленої труби експериментальні чи розрахункові значення параметрів $u_{0,кр}$ і $i_{0,кр}$ при $\frac{h}{r} = 0$ відомі, але їх треба перерахувати на випадок частково

замуленої труби. У даному разі використання узагальненої методики розрахунку є недоцільним із-за занадто громіздких обчислень. Тому нижче запропоновано прості розрахункові формули для оперативного перерахування названих параметрів.

В [5] встановлено, що критична швидкість потоку однотипної суспензії в трубах різних діаметрів змінюється залежно від діаметра труби згідно закону $u_{кр} \sim D^n$, де показник ступеня n є функцією середнього діаметра твердих часток d_s (рис. 3).

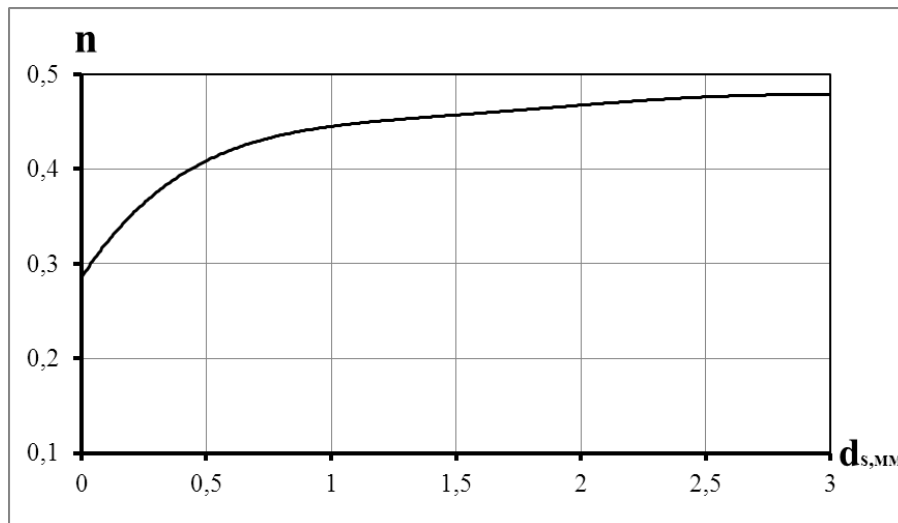


Рис. 3. Залежність n від d_s .
Fig. 3. The dependence n of d_s .

На підставі сказаного одержуємо формулу

$$u_{кр} = \left(\frac{R}{R_0}\right)^n u_{0,кр}, \quad (25)$$

де R_0 – гідравлічний радіус живого перерізу при $\frac{h}{r} = 0$.

Із (25) випливає, зокрема, що для заданого значення $u_{0,кр}$ швидкість $u_{кр}$ зменшується із збільшенням ступеня замулення, оскільки зменшується гідравлічний радіус R .

Що стосується формули для перерахунку значення $i_{0,кр}$, то її одержуємо, виходячи із наступних міркувань. На відміну від $H_{кр}$, параметри $K, \sigma, \Delta_s, S_{max}$ і $a_{кр}$, які містяться в (1), відносяться до характеристик твердого матеріалу і вони незмінні при переході від замуленої труби до частково замуленої. Тому, замінивши в (1) величини $i_{кр}$ і $H_{кр}$ на $i_{0,кр}$ і $H_{0,кр}$ відповідно, маємо

$$i_{0,кр} = \frac{K\sigma(\Delta_s-1)1,96S_{max}H_{0,кр}}{1+a_{кр}}, \quad (26)$$

де $H_{0,кр}$ – безрозмірна товщина висококонцентрованого шару потоку суспензії в замуленій трубі. В результаті ділення рівняння (1) на рівняння (26) одержуємо

$$i_{кр} = \frac{H_{кр}}{H_{0,кр}} i_{0,кр}. \quad (27)$$

Величини $H_{0,кр}$ і $H_{кр}$, визначаються із рис. 1 при відповідних їм аргументах $\frac{d_s}{4R_0}$ і $\frac{d_s}{4R}$. Оскільки для частково замуленої труби $\frac{d_s}{R} > \frac{d_s}{R_0}$ і, отже $H_{кр} > H_{0,кр}$, із (27) випливає, що завжди $i_{кр} > i_{0,кр}$.

Приклад розрахунку.

По замуленій горизонтальній трубі діаметром $D = 206$ мм потоком води транспортується у критичному режимі пісок. Його характеристики: середня крупність $d_s = 0,42$ мм; гідравлічна крупність $w_s = 4,5$ см/с; відносна густина $\Delta_s = 2,65$; гранично можлива об'ємна концентрація $S_{max} = 0,597$; вміст (в долях одиниці) дрібних фракцій $< 0,1$ мм складає $0,01$, а крупних $< 0,4$ мм – $0,85$; коефіцієнт тертя ковзання K , що відповідає діаметру часток $d_{85} = 0,4$ мм, дорівнює $0,53$. Середня об'ємна концентрація суспензії $S = 0,12$; параметр шорсткості внутрішніх стінок труби $b = 2,2$. Експериментальне значення критичної швидкості $u_{0,кр} = 2,93$ м/с, а відповідне їй значення $i_{0,кр} = 0,055$. Наведені дані запозичені із [12]. Задача полягає у визначенні параметрів $u_{кр}$ і $i_{кр}$ для течії суспензії у даній трубі у випадку часткового замулення.

Розрахунки виконані двома способами. У першому із них використано узагальнену методику розрахунку, в основу якої покладено рівняння (1) і (6), а у другому – формули (25) (при $n = 0,4$) і (27) для експрес розрахунку. Значення $\frac{h}{r}$ приймалися рівними $0; 0,25; 0,5$ і $0,75$. Результати розрахунків містяться у таблиці 2.

Таблиця 2. Результати розрахунку параметрів $u_{кр}$ і $i_{кр}$

Table 2. The results of the calculation of the parameters $u_{кр}$ and $i_{кр}$

I спосіб розрахунку				II спосіб розрахунку				
$\frac{h}{r}$	$H_{кр}$	$100i_{кр}$	$u_{кр}$ м/с	$100R$, м	$\frac{R}{R_0}$	$u_{кр}$ м/с	$\frac{H_{кр}}{H_{0,кр}}$	$100i_{кр}$
0	0,064	5,70	3,1	5,15	1	3,10	1	5,70
0,25	0,066	5,87	3,0	4,87	0,946	3,03	1,031	5,87
0,50	0,070	6,24	2,9	4,37	0,848	2,91	1,094	6,24
0,75	0,074	6,59	2,7	3,81	0,740	2,76	1,156	6,59

Отже, згідно з таблицею 2, обидва способи розрахунку параметрів $u_{кр}$ і $i_{кр}$ дають практично один і той самий результат, що й свідчить про відповідність методики експрес розрахунку узагальненій методиці. Також відмітимо, що у випадку незамуленої труби, тобто при $\frac{h}{r} = 0$, розрахункові значення $u_{0,кр} = 3,1$ м/с і $i_{0,кр} = 0,057$ добре узгоджуються з експериментальними значеннями $u_{0,кр} = 2,93$ м/с та $i_{0,кр} = 0,055$. При цьому відносне відхилення розрахункових значень $u_{0,кр}$ та $i_{0,кр}$ від експериментальні становить 5,8% і 3,6%, відповідно.

ВИСНОВОК

У роботі розроблено узагальнену методику гідравлічного розрахунку частково замулених і, зокрема, незамулених пульпопроводів. Також запропоновано методику гідравлічного експрес розрахунку частково замулених пульпопроводів, яка значно спрощена порівняно з узагальненою методикою розрахунку. Розроблені методики розрахунку науково обґрунтовані, характеризуються досить високим ступенем точності у широкому діапазоні зміни умов критичного режиму гідротранспортування і можуть бути застосовані у практиці проектування гідротранспортних систем.

Отже, дана робота у певній мірі заповнює собою прогалину щодо вивчення течії

суспензій в частково замулених трубах у загальній проблемі дослідження гідротранспорту.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Коберник С. Г.** Напорный гидротранспорт хвостов горнообогатительных комбинатов / С.Г. Коберник, В.И. Войтенко. К.: Наук. думка. 1967. 140 с.
2. **Карасик В. М.** Интенсификация гидротранспорта отходов и продуктов обогащения горнообогатительных комбинатов / В.М. Карасик, И.А. Асауленко, Ю.К. Витошкин. К.: Наук. думка. 1976. 155 с.
3. **Олейник А. Я.** О влиянии мельчайших частиц на основные параметры гидравлического трубопроводного транспорта твердых материалов / А.Я. Олейник, С.И. Криль // Докл. АН УССР, Сер.А. 1983. №5. С.38-41.
4. **Асауленко И. А.** Теория и прикладные аспекты гидротранспортирования твердых материалов / И.А. Асауленко, Ю.К. Витошкин, В.М. Карасик, С.И. Криль. К.: Наук. думка. 1981. 364 с.
5. **Криль С. И.** Напорные взвесенесущие потоки / С.И. Криль. К.: Наук. думка. 1990. 159 с.
6. **Криль С. И.** Вопросы гидродинамики взвесенесущих потоков / С.И. Криль // Прикладная гидромеханика. К.: Наук. думка. 1989. С.67-89.
7. **Силин Н. А.** Режимы работы крупных землесосных снарядов и трубопроводов / Н.А. Силин, С.Г. Коберник. К.: Изд-во АН УССР, 1962. 215 с.

8. **Силин Н. А.** Гидротранспорт угля по трубам / Н. А. Силин, Ю. К. Витошкин. К.: Изд-во АН УССР, 1964. 88 с.
9. **Силин Н. А.** Гидротранспорт / Силин Н. А., Витошкин Ю. К., Карасик В. М. К.: Наук. думка. 1971. 159 с.
10. **Кріль С. І.** До питання про реологічне моделювання суспензій / С.І. Кріль // Прикладна гідромеханіка, т.5 (77), №2. 2003. С.20-26.
11. **Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.** Справочник по математике. М.:ОГИЗ, 1948. 556 с.
12. **Силин Н. А.** Исследование напорных взвесенесущих потоков высокой концентрации. Диссерт. докт. техн. наук. К. 1964. 724 с.

REFERENCES

1. **Kobernik, S. G., & Voytenko, V. I. (1967).** *Napornyy gidrotransport khvostov gornoobogatitel'nykh kombinatov.* Kiev: Nauk. dumka. [in Russian]
2. **Karasik, V. M., Asaulenko, I. A., & Vitoshkin, YU. K. (1976).** *Intensifikatsiya gidrotransporta otkhodov i produktov obogashcheniya gornoobogatitel'nykh kombinatov.* Kiev: Nauk. dumka. [in Russian]
3. **Oleynik, A. YA., & Kril' S. I. (1983).** O vliyanii mel'chayshikh chastits na osnovnyye parametry gidravliche-skogo truboprovodnogo transporta tverdykh materialov. *Dokl. AN USSR, Ser.A. 5,* 38-41. [in Russian]
4. **Asaulenko, I. A., Vitoshkin, YU. K., Karasik, V. M., & Kril', S. I. (1981).** *Teoriya i prikladnyye aspekty gidrotransportirovaniya tverdykh materialov.* Kiev: Nauk. dumka. 1981. [in Russian] [in Russian]
5. **Kril', S. I. (1990).** *Napornyye vzvesenesushchiye potoki.* Kiev: Nauk. dumka. [in Russian]
6. **Kril', S. I. (1989).** Voprosy gidrodinamiki vzvesenesushchikh potokov. *Prikladnaya gidromekhanika, 2,* 67-89. [in Russian]
7. **Silin, N. A., & Kobernik, S. G. (1962).** *Rezhimy raboty krupnykh zemlesosnykh snaryadov i truboprovodov.* Kiev: Izd-vo AN USSR. [in Russian]
8. **Silin, N. A., Vitoshkin, YU. K. (1964).** *Gidrotransport uglya po trubam.* Kiev: Izd-vo AN USSR. [in Russian]
9. **Silin, N. A., Vitoshkin, YU. K., & Karasik, V. M. (1971).** *Gidrotransport.* Kiev: Nauk. dumka. [in Russian]
10. **Kril', S. I. (2003).** Do pitannya pro reologichne modelyuvannya suspensiy. *Prikladna gidromekhanika, 5 (77),* 20-26. [in Ukrainian]
11. **Bronshteyn, I. N., & Semendyayev, K. A. (1948)** *Spravochnik po matematike.* М.:ОГИЗ, [in Russian]
12. **Silin, N. A. (1964).** Issledovaniye napornykh vzvesenesushchikh potokov vysokoy kontsentratsii. [The study of pressure-bearing suspended flow of high concentration]. *Doctor's thesis.* Kiev. [in Russian]

Method of hydraulic calculation of partially silted slurry piping

Stepan Kril, Iryna Skorokhod, Volodymyr Fadeichev, Lyudmila Orlova

Abstract. A critical mode of transportation of solid dispersed materials by a stream of water in a partially muddy horizontal pipeline is considered. Typical of this mode of hydraulic transport is that the silt layer prevents the pipeline from rapid wear and that with increasing layer height, the critical flow velocity below which solid material precipitates into the sediment decreases, while the hydraulic friction resistance increases sharply. One of the important tasks of the study of the critical mode of motion of the slurry with partial siltation is to develop scientifically sound methods of calculating the critical flow velocity and specific losses of the friction head. In the work a generalized technique of hydraulic calculation of partially silted and, in particular, non-silted pipelines is developed which is based on a system of two algebraic equations describing the critical mode of operation of a pipeline. One equation is used to determine the specific friction head losses, and the other to determine the critical velocity corresponding to the specific head losses. A partial case is also considered when the experimental or calculated values of critical velocity and specific head losses are known for the unmodified pipe, but must be recalculated for the partially unmodified pipe. For this case, simple calculation formulas are proposed for the operational prediction of the named parameters in the case of partial siltation. Examples of calculation are given.

Key words: pipeline hydrotransport, partially muddy slurry pipeline, hydraulic calculation.

Стаття надійшла до редакції 24.04.2019