

3. Примеры расчетов по гидравлике. Учеб. пособие для вузов. Под ред. А.Д.Альтшуля-М.:Стройиздат, 1977, 225 с.
4. Деньгуб В.І. Узагальнений метод розрахунку сифонних трубопроводів – ДВНЗ «Криворізький національний університет». «Гірничий вісник». Наук.-техн. збірник. Вип 95(1), 2012, с 230-232
5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. М.: Книга по требованию, 2012. - 466 с
6. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем. С.Пб: АНО НПО «Мир и семья», 2001. 1154 с.

УДК 621.22 (6.04)

**Деньгуб В.І.**

*ДВНЗ «Криворізький національний університет»*

**АЛГОРИТМ НАБЛИЖЕНИХ РОЗРАХУНКІВ ГІДРАВЛІЧНОЇ КРУПНОСТІ ЗЕРНИСТИХ ЗАВИСІВ ГІДРОТРАНСПОРТУ**

**Вступ.** Кінцевою метою підготовки фахівців зі спеціальності «Водопостачання і водовідведення» є вміння проектувати і експлуатувати системи безнапірного та напірного гідротранспорту зернистих зависів. Вихідними даними для ряду задач транспортування твердих частинок та оцінки їх осідання в відстійниках та хвостосховищах є визначення гідравлічної крупності в залежності від розмірів частинок, форми та густини.

**Результати дослідження.** Питанню розрахунків гідравлічної крупності зернистих та шароподібних частинок присвячено цілий ряд досліджень [1,2,3,4]. Відомі як теоретичні, так і експериментальні залежності безпосереднього визначення гідравлічної крупності окремих видів зернистих частинок для обмеженого інтервалу зміни чисел Рейнольдса [5,6]. Але найбільш загальнозживаним і точним є метод послідовних наближень з використанням значень коефіцієнта лобового опору [4,7]. Через складну залежність лобового опору частинок різного виду відсутня їх універсальна аналітична залежність від чисел Рейнольдса. Внаслідок цього використовуються окремі експериментальні дані в вигляді графічної залежності або емпіричної формули. Другою складністю виконання наближених розрахунків гідравлічної крупності частинок є відсутність алгоритму розрахунків з рекомендаціями значення першого наближення та ряду наступних значень.

**Метою** даних досліджень є використання формули розрахунку гідравлічної крупності в неявному вигляді від значень коефіцієнта лобового опору і розробка на її основі алгоритму виконання послідовних наближень.

Гідравлічна крупність  $V_{г.к.}$  (м/с) части-

нок розраховується за формулою

$$V_{г.к.} = \sqrt{\frac{4(\rho_m - \rho)gd}{3\rho C_T}} \tag{1}$$

де:  $\rho_m, \rho$  - густина частинок і рідини, відповідно, кг/м<sup>3</sup>;  $g=9,81$  Н/кг;  $d$  – діаметр частинок, м;  $C_T$  – коефіцієнт опору при русі частинок в рідині.

Коефіцієнт опору  $C_T$  частинок залежить від числа Рейнольдса, що пов'язане зі швидкістю  $V_{г.к.}$

$$Re = \frac{dV_{г.к.}}{\nu} \tag{2}$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість рідини, м<sup>2</sup>/с.

Експериментальні дані А.П. Зегджа залежності опору частинок неправильної форми від числа Рейнольдса наведені на рис. 7.2 [7]. Розрахункова формула (1) має неявну залежність між параметрами  $V_{г.к.}$  та  $C_T$ , а тому значення  $V_{г.к.}$  визначаються шляхом послідовних наближень з використанням графіку на рис. 7.2 [7]. Відомі методики розрахунку  $V_{г.к.}$  не містять алгоритму послідовних наближень, а тому для досягнення необхідної точності треба виконати значний об'єм обчислень. Для усунення вказаного недоліку авторами застосовані наступні математичні перетворення.

Спочатку ліву і праву частину формули (1) було домножено на вираз  $d/\nu$ , а потім прологарифмовано при десятковій основі логарифмів. В результаті була отримана формула послідовних наближень

$$\lg Re = \lg \sqrt{\frac{4(\rho_m - \rho)gd^5}{3\rho \nu^2}} - 0,5 \lg C_T \tag{3}$$

Формула (3) є незручною, бо для її використання необхідно звертатися до графічної залежності  $C_T=f(Re)$  на рис. 7.2 [7], яка при послідовних наближеннях не дає необхідної точності. Для підвищення точності розрахунків графічна залежність замінена емпіричною формулою в вигляді квадратного тричлена. На основі використання відомого «методу середніх» отримана наступна

залежність

$$\begin{cases} 0,5 \lg C_T = 0,725 - 0,37 \lg Re + 0,055 \lg^2 Re; \lg Re \leq 2,4 \\ 0,5 \lg C_T = 0,15; \lg Re > 2,4 \end{cases} \quad (4)$$

В табл.1. наведені графічні значення  $\lg C_T$  та результати розрахунку за емпіричною залежністю

$$\begin{aligned} \lg C_T &= 1,45 - 0,74 \lg Re + 0,11 \lg^2 Re; Re \leq 2,4 \\ \lg C_T &= 0,3; Re > 2,4 \end{aligned} \quad (5)$$

Таблиця 1 - Графічні та емпіричні значення  $\lg C_T$

$\lg Re$	-1,5	-1,0	-0,5	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,4
$\lg C_T$ за рис. 7.2 [7].	2,75	2,40	1,50	1,45	1,20	0,80	0,50	0,40	0,30
$\lg C_T$ ф (5)	2,81	2,30	1,48	1,45	1,11	0,82	0,54	0,41	0,30

Аналіз формули (3) показує, що перший доданок правої частини не залежить від параметра  $Re$  і приймає сталі значення  $A=const$ .

$$A = \lg \sqrt{\frac{4(\rho_m - \rho)gd^3}{3\rho v^2}} \quad (6)$$

В зв'язку з введенням нового параметру  $A$  алгоритм наближених обчислень полягає в застосуванні методу «стиснених відображень». Розрахунки ведуть наступним чином.

Перше наближення лівої частини приймається  $\lg Re_1 = 0,5A$  і за цією величиною обчислюють значення  $0,5 \lg C_T$  за системою (4). В результаті отримують нерівність, наприклад,

$$\lg Re_1 < 1,185A - 0,725 - 1,375 * 10^{-2} A^2$$

Значення правої частини отриманої нерівності приймають за  $\lg Re_2$  і оцінюють наступну нерівність вигляду

$$\lg Re_2 < A - (0,725 - 0,37 \lg Re_2 - 0,055 \lg^2 Re_2) \quad (7)$$

Знову значення правої частини нерівності (7) приймають за  $\lg Re_3$  і оцінюють наступну нерівність аналогічного вигляду (7). Вказаний алгоритм розрахунків повторюють  $n$  раз і оцінюють нерівність вигляду

$$\lg Re_{n-1} < \lg Re_n \quad (8)$$

Розрахунки закінчують при співпаданні значень лівої і правої частини в третій цифрі після коми. Отриманий результат приймають за остаточний  $\lg Re_{n-1} < \lg Re_n$ .

Значення  $Re_n$  буде отримане внаслідок потенціювання

$$Re_n = 10^{\lg Re_n} \quad (9)$$

а гідравлічна крупність  $V_{г.к.}$  (за лівою частиною формули (1)) буде складати

$$V_{г.к.} = Re_k * v/d \quad (10)$$

Для перевірки вірності розрахунків за формулою (5) для остаточного  $Re_k$  обчислюється  $\lg C_T$  на основі потенціювання

$$C_T = 10^{\lg C_T} \quad (11)$$

Значення  $C_T$  підставляють в праву частину формули (1). При вірному розв'язанні ліве і праве значення  $V_{г.к.}$  будуть співпадати.

Залежності (4) та (5) характеризують значення  $0,5 \lg C_T$  та  $\lg C_T$  відповідно, частинки неправильної (пісок та щебінь). Для частинок правильної кулеподібної форми залежність коефіцієнта опору  $C_T$  від числа Рейнольдса відома на основі експериментів Л.І.Сєдова та аналітичної формули Клячко В.А. [8]. При її використанні можливо отримати залежність

$$\lg C_T = \lg [24Re^{-1} + 4Re^{-0,3(3)}] \quad (12)$$

Але права частина (12) незручна для розрахунків, а тому її замінено емпіричною формулою в вигляді квадратного тричлена

$$\lg C_T = 1,45 - 0,816 \lg Re + 0,065 \lg^2 Re \quad (13)$$

В табл.2. наведені результати розрахунків за формулами (12) та (13).

Аналіз результатів, що наведені в табл.2, показує, що незалежно від методів розрахунку, відповідні параметри мають задовільну збіжність. А тому при розрахунках гідравлічної крупності  $V_{г.к.}$  шароподібних частинок можливо користуватися формулами

Таблиця 2 - Результати розрахунків параметрів  $Re$ ,  $lg Re$ ,  $lg C_{\tau}$ ,  $C_{\tau}$  за даними різних авторів

$Re$	0,1	0,32	1,0	3,2	10	100	1000	10000
$lg Re$	-1,0	-0,5	0	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
$lg C_{\tau} \Phi (12)$	2,39	1,88	1,45	1,21	0,63	0,04	-0,37	-0,72
$lg C_{\tau} \Phi (13)$	2,33	1,81	1,45	1,06	0,70	0,08	-0,43	-0,80
$C_{\tau}$ за [8]	249	77,0	28,0	16,2	4,26	1,10	0,42	0,19
$C_{\tau}$ за ф (11)	244	75,0	28,0	11,4	5,00	1,20	0,37	0,16

$$0,5 \lg C_{\tau} = \lg [24Re^{-1} + 4Re^{-0,3(3)}]^{0,5} \quad (14)$$

$$0,5 \lg C_{\tau} = 0,725 - 0,408 \lg Re + 0,033 \lg^2 Re \quad (15)$$

їх вигляд при використанні формули (3) буде залежати від вибору користувача.

В якості ілюстрації використання запропонованого авторами алгоритму розрахунку гідравлічної крупності піщинок діаметром  $d=0,00025$  м,  $\rho_m=1800$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup>, з врахуванням значення  $A$  за формулою (6), отримана наступна розрахункова формула

$$\lg Re_i = 1,11 - 0,5 \lg C_{\tau} \quad (16)$$

де значення  $0,5 \lg C_{\tau}$  для  $Re_i$  розраховувались за верхньою частиною залежності (4). В результаті отримано ряд послідовних наближень:  $0,555 < 0,577$ ;  $0,577 < 0,583$ ;  $0,583 < 0,585$ ;  $0,585 < 0,586$ ;  $0,586 = 0,586$ . Кінцевим результатом є  $\lg Re_5 = 0,586$ ;  $Re_5 = 3,855$ ;  $V_{г.к.} = 0,0154$  м/с;  $\lg C_{\tau} = 1,048$ ;  $C_{\tau} = 11,17$ . Розрахунок значення  $V_{г.к.}$  за правою частиною формули (1) при  $C_{\tau} = 11,17$  дає  $V_{г.к.} = 0,0153$  м/с; тобто  $0,0154 \approx 0,0153$  (м/с)

Розрахунки за наближеною формулою (1), без її логарифмування, при тих же вихідних даних і використанні графічної залежності  $\lg C_{\tau} = \lg Re$  дають наступне [7]  $\lg Re = 0,7$ ;  $Re = 5,012$ ;  $V_{г.к.} = 0,020$  м/с (зліва);  $\lg C_{\tau} = 0,9$ ;  $C_{\tau} = 7,9$  і значення  $V_{г.к.} = 0,0182$  м/с, тобто  $0,020 > 0,0182$  (м/с). Розбіжність результатів  $V_{г.к.}$  лівої і правої частини формули (1) пояснюється: а) відсутністю системності (алгоритму) при наближених розрахунках; б) похибками, що виникають при використанні графічної залежності  $\lg C_{\tau} = f(\lg Re)$ .

Таким чином, проведені авторами показові розрахунки і порівняння їх з даними інших авторів підтверджують працездатність запропонованого алгоритму наближених розрахунків гідравлічної крупності зернистих частинок в водяному середовищі.

**Висновки.** 1. Складна залежність лобового опору частинок від чисел Рейнольдса і необхідність використовувати цю залежність при визначенні гідравлічної крупності частинок вимушують використовувати метод послідовних наближень при розрахунках.

2. Внаслідок проведених досліджень отримано розрахункову формулу і алгоритм виконання послідовних наближень, що дозволяє визначити параметр першого наближення розрахунку і подальші значення наступних наближень.

3. Для забезпечення швидкої збіжності результатів розрахунку рекомендується експериментальні дані залежності лобового опору  $C_{\tau}$  від числа Рейнольдса для різних зернистих матеріалів подавати в вигляді емпіричної формули в системах координат  $(\lg C_{\tau}, \lg Re)$ .

**ЛІТЕРАТУРА:**

1. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. 3 изд., т.1-2 – М.: Гостехиздат, 1954-1955.
2. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеоздат, 1962, 374с.
3. Леви И.И. Динамика русловых потоков, 2 изд., – М.: Госэнергоиздат, 1957.
4. Гидравлика, под общей редакцией проф. И.И. Агроскина, изд. четвертое – М.: «Энергия», 1964. 352с. с черт.
5. Зегжа А.П. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах – М.: Стройиздат, 1957, 278с.
6. Крыль С.И. Напорные взвесенесущие потоки. – К.: Наукова думка, 1990.
7. Константінов Ю.М., Гіжа О.О. Інженерна гідравліка. Підручник для студентів вищих навч. закладів. – К.: Видавничий дім «Слово», 2006, - 432с.
8. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. – Л.: «Химия», 1971, 280с.