

УДК 621.22 (6.04)

О.М. ГОЛИШЕВ, д-р техн. наук, проф.,
В.І. ДЕНЬГУБ, В.А. КОНОВАЛЮК, кандидати техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

ЕМПІРИКО-АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ГРАВІТАЦІЙНОЇ ШВИДКОСТІ ОСІДАННЯ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК

Мета. Вихідними даними для проектування і подальшої експлуатації систем вентиляції, аспірації, напірного і безнапірного гідротранспорту зернистих частинок є значення гравітаційної швидкості осідання (швидкості витання) в транспортних потоках. Через складну залежність коефіцієнта лобового опору частинок від числа Рейнольдса, яка визначається експериментально і подається в табличній або графічній формі, виникає необхідність проведення наближених розрахунків. Це створює певні незручності і потребує значного проміжку часу. Метою роботи є розробка зручного методу розрахунку гравітаційної швидкості осідання твердих частинок.

Методи дослідження. В роботі використано аналітичний метод дослідження, за допомогою якого встановлено математичну залежність між коефіцієнтом опору при русі частинок в рідині, числом Рейнольдса і гравітаційною швидкістю осідання.

Наукова новизна. Заміна табличної і графічної форми подання експериментальних даних емпіричною залежністю з подальшим використанням розрахункових параметрів з неперервною зміною розміру частинок і густини матеріалу.

Практична значимість. На основі проведених досліджень рекомендовано табличну або графічну форми експериментальних даних залежності коефіцієнта лобового опору ілюструвати емпіричною залежністю від чисел Рейнольдса. Вказано загальний вигляд емпіричної залежності, яку можливо застосувати для різних форм частинок подрібненого матеріалу. Використання емпіричної залежності в подальших розрахунках дозволяє аналітично розраховувати гравітаційну швидкість осідання частинок.

Результати. Рекомендований емпірично-аналітичний метод розрахунку дозволяє зменшити час розрахунків при більш широкому діапазоні зміни вихідних параметрів обчислень.

Ключові слова: Інженерна гідравліка, гравітаційне осідання частинок, метод розрахунку.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Кінцевою метою підготовки фахівців зі спеціальності «Будівництво та цивільна інженерія» спеціалізацій «Теплогазопостачання і вентиляція» та «Водопостачання та водовідведення» є вміння проектувати і експлуатувати системи вентиляції, аспірації, безнапірного і напірного гідротранспорту на збагачувальних фабриках та комбінатах. Вихідними даними для ряду задач транспортування твердих частинок та оцінки інтенсивності їх осідання в потоках середовищ є визначення гравітаційної швидкості осідання в залежності від розмірів і форм частинок та густини матеріалу.

Аналіз досліджень і публікацій. Питанню розрахунків гідравлічної крупності зернистих та шароподібних частинок присвячено цілий ряд досліджень [1-4,8,9,12-15]. Відомі як теоретичні, так і експериментальні залежності безпосереднього визначення гравітаційної швидкості осідання окремих видів зернистих частинок для обмеженого інтервалу зміни чисел Рейнольдса [5,6]. Але найбільш загальноновживаним і точним є метод послідовних наближень з використанням значень коефіцієнта лобового опору [5,7]. Через складну залежність лобового опору частинок різного виду відсутня універсальна аналітична залежність їх від чисел Рейнольдса.

Постановка завдання. Задачею цієї роботи є розробка аналітичного методу розрахунку гравітаційної швидкості осідання твердих частинок конкретного подрібненого мінералу або руди на основі використання експериментальних даних залежності коефіцієнта лобового опору від чисел Рейнольдса і представлення табличної і графічної форми у вигляді емпіричної залежності.

Викладення матеріалу та результати. Швидкість осідання частинок V_g розраховується за формулою, м/с

$$V_g = \sqrt{\frac{4(\rho_m - \rho)gd}{3\rho C_m}}, \quad (1)$$

де ρ_T і ρ – густина відповідно твердих частинок та середовища (повітря чи води), кг/м^3 ; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; d – діаметр частинок, м ; C_T – коефіцієнт опору при русі частинок в рідині.

Формула (1) є рівнянням в неявному вигляді, так як коефіцієнт C_T залежить від швидкості V_g . Тому розв'язання рівняння (1) потребує застосування певних методів, наприклад методу послідовних наближень [7,8]. Для перетворення цього рівняння авторами проведені наступні дослідження.

При множенні лівої і правої частини на відношення (d/v) , де v – кінематична в'язкість середовища, $\text{м}^2/\text{с}$, отримано рівняння

$$\text{Re}_g = f[\rho_T, \rho, d, C_T(\text{Re}_g)] \quad (2)$$

Для його розв'язку в аналітичному вигляді необхідно було підібрати таку емпіричну залежність $C_T(\text{Re}_g)$, яка б дозволила отримати достовірний результат. Для твердих частинок правильної шароподібної форми Альтшулем А.Д. [5] запропонована залежність

$$C_T = 0,112 \left[1 + (1 + 214/\text{Re}_g)^{0,5} \right]^2 \quad (3)$$

Після підставлення значення C_T в залежність (2) і виконання необхідних перетворень, авторами отримано вираз для числа Рейнольдса, з врахуванням швидкості V_g

$$\text{Re}_g = A^2 / (2A + 214), \quad (4)$$

де параметр A розраховується на основі вихідних даних

$$A = \frac{10,8d^{1,5}}{v} \left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right)^{0,5}. \quad (5)$$

Після обчислення Re_g гравітаційна швидкість осідання V_g визначається на основі залежності

$$V_g = v \text{Re}_g / d, \quad (6)$$

а коефіцієнт лобового опору C_T розраховується за формулою (3) на основі значення Re_g .

Для більш детальної перевірки метода розрахунку для подрібнених частинок була використана формула Клячко В.П. [2] залежності коефіцієнта лобового опору C_T від числа Рейнольдса

$$C_T = 24\text{Re}^{-1} + 4\text{Re}^{-1/3}. \quad (7)$$

Але через те, що її неможливо застосувати разом із залежністю (1), вираз (7) був трансформований у формулу яка подібна залежності (3) Альтшуля А.Д.

$$C_T = 0,112 \left[1 + (1 + 235/\text{Re}_g)^{0,5} \right]^2. \quad (8)$$

В табл. 1 наведено результати розрахунків за методом авторів на основі залежностей (3) та (8), а також визначена швидкість V_g за рекомендованою Гордоном Г.М. [3] формулою

$$V_g = \rho_m g d^2 (18\rho v)^{-1}. \quad (9)$$

Прийнявши $g=9.81 \text{ Н/кг}$; $\rho=1,2 \text{ кг/м}^3$; $v=15,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ формула (9) спрощується і має вигляд

$$V_g = 3 \cdot 10^4 \rho_m d^2. \quad (10)$$

В табл. 1 також наведено значення швидкості вітання за номограмами [1].

Таблиця 1

Значення швидкості гравітаційного осідання частинок (швидкості вітання)
при $\rho=1,2 \text{ кг/м}^3$; $v=15,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

Вихідні дані	Діаметр частинок d , мкм						
	10	20	50	100	150	200	250
	Густина матеріалу ρ_T , кг/м^3						
	9000	6000	5000	4000	3000	2000	1500
Послідовність розрахунків	Значення швидкості вітання V_g , см/с						
(3), (5), (4), (6)	3,2	10,0	38,0	101,0	146,0	156,0	167,0
(9), (5), (4), (6)	2,9	9,7	36,0	95,0	138,0	148,0	159,0
(10)	2,7	7,2	37,6	120,0	203,0	240,0	282,0
Графічний метод	2,5	7,0	32,0	62,0	82,0	84,0	88,0

Аналіз розрахунків показує, що для частинок малих діаметрів ($d < 50$ мкм) запропонований авторами метод з використанням залежності Альтшуля і трансформованої залежності Клячко В.П. та графічний метод, дають майже однакові результати. Для частинок з діаметрами в інтервалі $50 \div 250$ мкм спостерігається розбіжність в значеннях V_g , обчислених за емпірично-аналітичним методом авторів і графічним методом. Це пояснюється тим, що залежності (3) і (9) характеризують значення коефіцієнта C_T для частинок правильної кулеподібної форми. У номограмах не вказано, для якої форми частинок справедливі графічні залежності, тому вони дають розбіжність з графіко-аналітичним методом.

Залежність (10) в інтервалі $d \in (10, 50)$ мкм також дає значення V_g , які дуже близькі з результатами емпірико-аналітичного та графічного методів. Але для діаметрів частинок $d > 50$ мкм розрахунки за цією залежністю дають дуже завищені значення. Таким чином, залежність (10) можна використовувати як експрес оцінку швидкості V_g для частинок $d \leq 50$ мкм.

В цілому для більш коректної оцінки швидкості V_g конкретної форми частинок при розмірах $d > 50$ мкм слід використовувати експериментальні дослідження коефіцієнта лобового опору C_T , які потім замінити більш гнучкою емпіричною залежністю

$$C_T = 0,112 \left[1 + (a + b / Re_g)^{0,5} \right]^2 \quad (11)$$

Визначення параметрів a та b в емпіричній залежності (11) за експериментальними даними в матеріалах даної статті авторами не розглядається. Для їх знаходження рекомендується користуватися методиками, що викладені в довідниках з вищої математики [10,11].

В якості ілюстрації конкретного вигляду емпіричної залежності (11), авторами використана графічна залежність коефіцієнта C_T від числа Рейнольдса Re , що наведена в монографії Зегджа А.П. [6]. На основі цих даних отримано залежність (11) при визначених параметрах $a=11$ і $b=214$, тобто

$$C_T = 0,112 \left[1 + (11 + 214 / Re_g)^{0,5} \right]^2 \quad (12)$$

Вихідні графічні дані [5] та результат розрахунку за формулою (8), наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Графічні та емпіричні значення коефіцієнта лобового опору								
Число Рейнольдса Re	0,1	0,5	1,0	5,0	10,0	20,0	40,0	60,0
Коефіцієнт $C_T^{гр}$	за даними Зегджа А.П.							
	251,2	55,2	28,1	7,9	5,00	3,70	2,90	2,70
Коефіцієнт C_T^e	на основі розрахунків за формулою (12)							
	251,4	54,0	28,6	7,78	5,01	3,58	2,85	2,58
$\left((C_T^{гр} - C_T^e) / C_T^{гр} \right) \cdot 100\%$	-0,08	2,17	1,78	1,52	-0,2	3,24	1,72	4,44

Аналіз результатів розрахунків, що викладені в табл.2., показує, що емпірична залежність (12) достатньо коректно характеризує експериментальні дані коефіцієнта. При цьому відносна похибка даних не перевищує 5 %, що дає можливість використовувати залежності (12) в подальших розрахунках.

Відповідно з вищевикладеним методом спочатку розраховується параметр A за формулою (5). На основі загального вигляду емпіричної залежності (11) після проведення необхідних перетворень отримано загальний розв'язок рівняння (2) з врахуванням залежності (11)

$$Re_g = -\frac{A+0,5b}{a-1} + \left[\left(\frac{A+0,5b}{a-1} \right)^2 + \frac{A^2}{a-1} \right]^{0,5} \quad (13)$$

При значенні $a=11$; $b=214$, розв'язок (13) приймає вигляд

$$Re_g = -\frac{A+107}{10} + \left[\left(\frac{A+107}{10} \right)^2 + \frac{A^2}{10} \right]^{0,5} \quad (14)$$

Для порівняння результатів розрахунку за формулами (5), (14), (6) з даними інших авторів, нижче розглянутий наступний приклад.

Приклад розрахунку. Визначити швидкість осідання V_g для середнього діаметра частинок подрібненого матеріалу $d=0,25 \cdot 10^{-3}$ м (250 мкм) густиною $\rho_T=1800$ кг/м³, що осідають в водному середовищі $\rho=1000$ кг/м³, з кінематичною в'язкістю $\nu=1,0 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Розрахунок.

1. За формулою (5) визначається параметр A

$$A = \frac{10,8(0,25 \cdot 10^{-3})^{1,5}}{1,1 \cdot 10^{-6}} \left(\frac{1800}{1000} - 1 \right)^{0,5} = 38,18.$$

2. За формулою (10) обчислюється число Re_g

$$Re_g = -14,52 + \left[(14,52)^2 + 0,1 \cdot 38,18^2 \right]^{0,5} = 4,36.$$

3. На основі залежності (6) розраховується гравітаційна швидкість осідання V_g (гідравлічна крупність), м/с.

$$V_g = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 4,36 / (0,25 \cdot 10^{-3}) = 0,0174.$$

Результати розрахунку аналогічного прикладу, що наведений в джерелах [6,7], і який виконувався методом послідовних наближень, дають значення швидкості осідання $V_{Г.К.} = 0,0182$ м/с.

Відносна похибка δ розрахунків за методом авторів і методом послідовних наближень становить

$$\delta = \frac{V_{Г.К.} - V_g}{V_{Г.К.}} \cdot 100\% = \frac{0,0182 - 0,0174}{0,0182} \cdot 100\% \approx 4,18\%.$$

Відносна похибка розрахунків $\delta = 4,18\%$ не перевищує граничне значення похибки для інженерних розрахунків $\delta < 10\%$ і, навіть, менша. В зв'язку з цим запропонований авторами емпірично-аналітичний метод розрахунку швидкості гравітаційного осідання твердих частинок є достатньо коректним і може бути використаний як в учбовому процесі, так і в фаховій діяльності.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Складна залежність, яка подається в табличній або графічній формі, коефіцієнта лобового опору частинок від чисел Рейнольдса і необхідність використовувати цю залежність при розрахунках гравітаційної швидкості осідання вимушують використовувати метод послідовних наближень, що має певні незручності і потребує значні витрати часу.

Унаслідок проведених досліджень запропоновано експериментальну табличну або графічну залежність коефіцієнтів лобового опору від чисел Рейнольдса замінити емпіричною залежністю і вказано загальний вигляд такої залежності, що дозволяє в подальших розрахунках аналітичним методом розраховувати гравітаційну швидкість осідання частинок різноманітної форми.

Експериментальні дані, які отримані для частинок, що утворились при подрібненні певної гірничої маси, і які на основі рекомендацій авторів замінені емпіричною залежністю, дозволяють розширити діапазон розрахунків гравітаційної швидкості осідання як в газовому, так і в рідинному середовищі при неперервній зміні діаметрів і густини частинок, а також густини транспортного середовища.

Список літератури

1. **Деньгуб В.І.** Алгоритм наближених розрахунків гідравлічної крупності зернистих зависів гідротранспорту // Науковий вісник будівництва. Х.: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2016. – № 3(85). – С. 171-173.
2. **Коузов П.А.** Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов – 3-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1987. – 263 с.
3. **Гордон Г.М.** Пылеулавливание и очистка газов / Г.М. Гордон, И.Л. Пейсахов. – М.: Металлургия, 1968. – 499 с.
4. **Криль С.И.** Напорные взвесенесущие потоки. – К.: Наукова думка, 1990. – 160 с.
5. **Альтшуль А.Д.** Гидравлические сопротивления – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1982. – 224 с.
6. **Зегжа А.П.** Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах – М.: Стройиздат, 1957. – 278 с.
7. **Константинов Ю.М.** Инженерна гідравліка / Ю.М. Константинов, О.О. Гіжа. Підручник для студентів ВНЗ – К.: Видавничий дім "Слово", 2006. – 432 с.
8. **Альтшуль А.Д.** Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев. Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Стройиздат, 1975. - 323 с.
9. **Гончаров В.Н.** Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат, 1962, 374с.
10. **Алексеева І. В.** Довідник з вищої математики / І. В. Алексеева, В.О. Гайдей, О.О. Диховичний, Л.Б. Федорова. – Довідник. — К.: НТУУ «КПІ», 2011. — 212 с.
11. **Валєєв К.Г.** Вища математика / К.Г. Валєєв, І.А. Джалладова: У 2 ч.– Ч.2. – К.: КНЕУ, 2002. – 451 с.
12. **Великанов М.А.** Динамика русловых потоков. 3 изд., т.1-2 – М.: Гостехиздат, 1954-1955г. – 646 с.

13. Бызова Н.Л. Экспериментальное исследования атмосферной диффузии и расчёты рассеивания примеси / Н.Л. Бызова, Е.К. Гаргер, В.И. Иванов. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 280 с.
14. Агроскин И.И. Гидравлика – М.: «Энергия», 1964. – 352с.
15. Леви И.И. Динамика русловых потоков, 2 изд., – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 224 с.

Рукопис подано до редакції 27.03.17

УДК 622.063.8

А.Л. ШИРИН, В.А. РАСЦВЕТАЕВ, кандидаты техн. наук, доц.,
И.В. ИНЮТКИН, ассистент, ГВУЗ «Национальный горный университет»

ОПЕРАТИВНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ГОРНОРУДНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Цель. Создание системы оперативно-производственного контроля технического состояния горнотранспортного оборудования шахт и карьеров для повышения его адаптационной способности в сложных условиях эксплуатации.

Методы исследования. Анализ и оценка показателей надежности основных агрегатов и узлов погрузочно-доставочных машин по частоте выхода их из строя и потребности запасных частей для ликвидации неисправностей. Формирование банка данных об условиях эксплуатации и показателей исправного состояния и нормального функционирования узлов и агрегатов.

Научная новизна. Координация предупредительных замен деталей и предотвращение крупных поломок в узлах и агрегатах достигается путем оперативного диагностирования и, имея достаточное количество статистических данных об отказах узлов и агрегатов погрузочно-доставочной машины, определяет зависимость потребности запасных частей по категории сложности их устранения с планируемым удлинением межремонтных периодов. Показателями, оценивающими надежность погрузочно-доставочной машины нового поколения, следует считать коэффициенты технического использования и снижения эффективности машины.

Практическое значение. Адаптация самоходного оборудования высокого технического уровня в специфических условиях шахты Новоконстантиновского месторождения и нерудных карьеров Украины, при соблюдении графиков технического обслуживания, позволит обеспечить оперативно-производственное определение технического состояния погрузочно-доставочных машин нового поколения и прогнозировать оптимальное функционирование технологических процессов добычи полезных ископаемых в сложных горнотехнических условиях эксплуатации.

Результаты. Установлено, что показатели надежности узлов и агрегатов погрузочно-доставочных машин нового поколения, определяются условиями их взаимодействия с характеристиками дорожного покрытия и элементами горных выработок. В этой связи исследования, направленные на установление рациональных параметров взаимодействующих элементов системы являются первоочередной задачей.

Ключевые слова: коэффициенты технического использования и снижения эффективности машины, транспортно-технологическая схема, техническое обслуживание, адаптация самоходного оборудования.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Современным курсом успешно развивающихся горнорудных предприятий, ведущих добычу полезных ископаемых подземным и открытым способами, является создание транспортно-технологических схем на базе применения оборудования, производства известных зарубежных фирм (Atlas Copco, Sandik, Volvo, JCB, Hitachi, Hyundai, Caterpillar). Типичными образцами такого оборудования, используемыми в горнодобывающих отраслях Украины, являются малогабаритные погрузочно-доставочные машины (ПДМ) для вывоза руды из очистных забоев и транспортирования ее по участковым выработкам, колесные погрузчики, мобильные дробильно-сортировочные комплексы, а также автомобили повышенной грузоподъемности.

Сравнительная оценка эксплуатационных параметров зарубежного самоходного оборудования, применяемого на отечественных предприятиях, с показателями работы аналогичных образцов за рубежом позволила выявить ряд проблем, характерных для предприятий использующих высокотехнологическое оборудование нового поколения. В процессе изучения причин нестабильной работы техники нового поколения (ТНП), факторы, определяющие те или иные проблемы, были систематизированы на технические, технологические и организационные.

К основным организационным факторам, влияющим на показатели работы горнотранспортного оборудования зарубежного производства, относятся ошибки по вине руководящего персонала. Например, отсутствие в учебных центрах предприятий и в системе профтехобразования программ специальной подготовки горнорабочих для изучения современных методов