

УДК 533.601.16

DOI: 10.15587/2312-8372.2020.204060

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ АЕРОДИНАМІЧНИХ ЯКОСТЕЙ КОМПОНЕНТ СУМІШЕЙ НА СЕПАРУВАННЯ В ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ВИХРОВИХ АПАРАТАХ

Кнауб Л. В.

Об'єктом дослідження є газодинамічні вихрові процеси у гетерогенних полідисперсних потоках. Одним з найбільш проблемних питань є визначення аеродинамічних характеристик компонент гетерогенного полідисперсного середовища, які необхідні для створення математичної моделі процесу сепарування. В ході дослідження використовувалися методи математичного моделювання на підставі теорії подібності. Розроблено методику оцінки аеродинамічних параметрів компонент суміші, на підставі якої складено ряд аеродинамічної подібності. Отримано коефіцієнти піднімальної сили, аеродинамічного опору, бічної сили, повздовжнього, поперечного та обертального моментів складових зернової суміші. Це необхідно для теоретичних досліджень газодинамічних процесів у вихрових сепараторах при нестационарній тривимірній течії з перемінними густиною потоку, концентрацією та витратою складових сепарованої суміші та несомої фракції. Отримано вібраційний критерій Рейнольдса, на підставі якого визначаються траєкторії й енергія вихрового руху окремих компонент та ступінь поділу гетерогенних сумішей. Це дозволило удосконалити математичну модель процесу розподілу гетерогенних полідисперсних сумішей у запропонованих енергозберігаючих вихрових сепараторах. Отримані результати дали підставу для удосконалення загальної теорії гетерогенних вихрових потоків уведенням критерію зовнішнього збурення, який враховує опір вихрового силового поля та амплітудно-частотний енергетичний рівень. Завдяки цьому забезпечується можливість оцінки впливу будь-якого аргументу на шукану функцію. Результати досліджень дозволили автоматизувати аналіз характеристик процесу й порівняння їх по параметрах з експериментальними даними. А також оцінити відповідність динамічних, кінематичних і газодинамічних функцій, розрахованих по заданих геометричних параметрах вихрових апаратів з функціями, отриманими за усередненими значеннями. Ці дані дозволили відпрацювати діапазон варіацій параметрів геометричного оформлення вихрових апаратів по зонах, параметрах на вході, виході та ступенях сепарації, мінімізувати кількість виготовлених лабораторних і напівпромислових вихрових апаратів і уніфікувати ряд вузлів. У порівнянні з аналогічними відомими сепараторами запропоновані вихрові апарати забезпечують зменшення затрат на підготовку сировини у зерноперероблювальній галузі у десятки разів внаслідок усунення рухливих робочих деталей, вузлів і сит.

**Ключові слова:** аеродинамічні параметри, вихровий сепаратор, гетерогенна суміш, швидкість перерозподілу, коефіцієнт опору.

## 1. Вступ

Розвиток теорії оптимізації тепло- і масообміну гетерогенних вихрових потоків для поділу компонент суміші є актуальним, тому що дозволяє вирішувати важливу народногосподарську проблему економії енергії та покращення довкілля. Вирішення вказаної проблеми пропонуємо за рахунок впровадження у технологічні процеси вихрових апаратів, які за своєю конструкцією дозволяють зменшити енергоспоживання та працюють за замкнутим циклом [1, 2]. Всебічні дослідження сепарування гетерогенних сумішей показують, що основні характеристики вихрових сепараторів, такі як ефективність і чіткість не завжди відповідають вимогам технологічних процесів [3, 4]. Пов'язано це, насамперед, з тим, що сепаровані суміші складаються з компонент, які широко змінюються за гранулометричним складом, щільністю, аеродинамічними параметрами, критичними швидкостями, концентрацією та ін. [5, 6]. У літературі по ряду експериментальних досліджень аеродинаміки агрегатів або окремих елементів добре та повно розроблені аеро- і газодинамічні процеси обтікання, зриву потоків, стрибки ущільнень і розрідження для об'єктів різних форм і розмірів [7, 8]. Але питання розробки обтікання дрібних об'єктів пов'язані з певними труднощами, зокрема, з моделюванням [9, 10]. Перехід від збільшеної моделі до вихідних розмірів призводить до необґрунтованих збільшень помилок з двох причин. По-перше, збільшення моделі призводить до перекручування картини відриву потоків і зміні убік збільшення пограничного шару, чого в малих масштабах може і не бути, тому що в двофазних потоках величина коефіцієнта ковзання лежить у широких межах. А, по-друге, має місце погіршеність виміру параметрів потоків. Крім того, рух часток у двофазному потоці є рух у супутніх течіях, а не окремих складових, як це розглядається в аеродинамічній трубі. Таким чином, розробка методики оцінки аеродинамічних параметрів є актуальною задачею. *Об'єктом досліджень* є газодинамічні вихрові процеси у гетерогенних полідисперсних потоках. *Метою досліджень* є удосконалення загальної теорії сепарування гетерогенних полідисперсних потоків.

## 2. Методика проведення досліджень

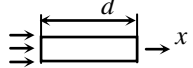
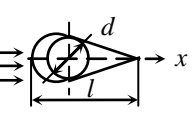
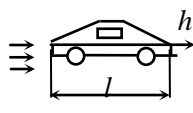
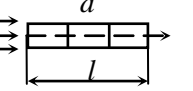
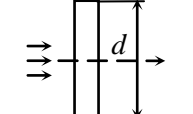
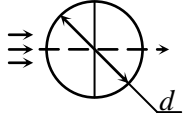
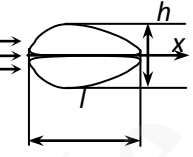
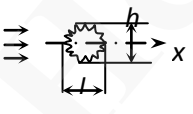
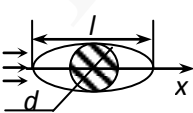
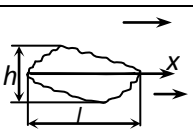
Проведення досліджень по визначенню аеродинамічних опорів для двофазного середовища здійснювалися на підставі теорії вихрового газодинамічного поділу гетерогенного полідисперсного потоку. За допомогою теорії подібності та методів математичного моделювання за отриманими даними побудований аеродинамічний ряд тіл [10] (табл. 1).

Рішення зазначеної вище задачі здійснювалося теоретично й експериментально за допомогою продувки моделей компонент зернової суміші, виготовлених у масштабі 43:1. Для порівняння використовувалися автомобіль, пластина та ін. у масштабі 1:43, як стандартні моделі для малої аеродинамічної труби з постійними

тиском і витратою повітря. За результатами дослідів визначені критерії Струхаля, Фруда, Ейлера, Рейнольдса, Архімеда та Барсукова [10].

Таблиця 1

Коефіцієнти аеродинамічної подібності

№ з/п	Характерна форма	Назва тіла	$l/d$ $l/h$	$c_s$	$f_i$	$Re$
1	2	3	4	5	6	7
1		Пластина	$l = \infty$ $h \rightarrow 0$	$\approx 0$	$\approx 0$	$2,0 \cdot 10^3$
2		Тіло, яке добре обтікається	2,5	0,04 0,05 0,09	$d$	$2,0 \cdot 10^3$
3		Автомобіль	3,12–4,0	0,24– $x$ 0,37– $y$ 0,45– $z$	$2,24m^2$ $2,17m^2$ $1,77m^2$	$2,7 \cdot 10^3$
4		Квадрати сполучені	1,5–3,5	0,90	14,0–24,0	$4,6 \cdot 10^3$
5		Пластина	–	1,20	$d$	$3,7 \cdot 10^3$
6		Крапля (сфера)	1	0,048	$\pi d^2/4$	$4,35 \cdot 10^3$
7		Пшениця	2,6–2,4	0,0478 0,051 0,92	4,7–6,25	$4,35 \cdot 10^3$
8		Кукіль	1,75–1,46	0,08	4,4–13,2	$3,4 \cdot 10^3$
9		Ріжок	2,5–4,7	0,04 1,0	2,0–15,6	$6,6 \cdot 10^3$
10		Вівсюг	6,1–6,6	0,2	2,3–9,0	$6,0 \cdot 10^3$

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7
11		Гречка в'юнкова	1,25–1,38	0,93	2,56–9,3	$11,0 \cdot 10^3$
12		Дика редька	1,7–1,62	0,05	3,4–29,0	$1,4 \cdot 10^3$
13		Гречка татарська	1,8–1,6	0,05	4,8–12,9	$1,4 \cdot 10^3$
14		В'юнок польовий	2,2–1,53	0,05	1,54–9,52	$1,5 \cdot 10^3$

Оцінку зовнішнього збурення на дискретні компоненти (відхилення ліній струму) здійснювали за виведеним критерієм Барсукова:

$$Bs = \frac{Eu \cdot Re}{Ar} \cdot A = \frac{Eu \cdot Re}{Ar} \cdot \frac{\rho_0 v_n^2}{\rho v_0^2 - \rho v^2},$$

де  $A = \frac{\rho_0 v_n^2}{\rho v_0^2 - \rho v^2}$  – відносний динамічний напір збурень;

$\frac{Eu \cdot Re}{Ar}$  – «енергетичний» потенціал силового поля.

### 3. Результати досліджень та обговорення

Точність теоретичних досліджень залежала від того, наскільки близькі до дійсних значень коефіцієнти аеродинамічного опору компонент потоку визначені для моделей. Вільно просторовими положеннями моделей компонент при продувці отримані коефіцієнти піднімальної сили, аеродинамічного опору, бічної сили, подовжнього, поперечного та обертального моментів. Характер обтікання (лінії струму) для моделей зерна та домішок визначалися за допомогою рівномірно розподіленої димової гребінки з діаметром елементарного струменя, який дорівнює 2 мм, при постійному числі Рейнольдса. На підставі отриманих даних визначалися значення коефіцієнтів у залежності від характерних положень щодо потоків і розмірів зерна пшениці та домішок, як і для стандартних моделей автомобіля, пластини та ін. (табл. 1).

Достовірність обраного значення коефіцієнта опору в побудованому ряді тіл підтверджували на підставі міделева перетину  $f_1$  та співвідношення характерних розмірів ( $l/h$  або  $l/d$ ) уздовж осі  $x$ . Також додатково враховували швидкості потоку обтікання, характерні профілі частин тіл, їхні розміри та

повноту форми по осях  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . При цьому необхідно було оцінити стан поверхні тіл та їхнє розташування відносно осі  $x$ .

Деяка погрішність може бути тільки від впливу потоків, що зриваються, і обертання тіл відносно осей, а також ударів. Зовнішні збурення набігаючого потоку, який змінює траєкторії окремих компонент суміші визначалися за критерієм опору вихрового силового поля та збурюючого коливання від набігаючого потоку – критерієм  $Bs$  (рис. 1). Отримані результати справедливі для сірчистих сполук, пилу, кам'яного вугілля; мінеральних домішок, зерна пшениці, важко відокремлюваних домішок: куколю, ріжка та ін.

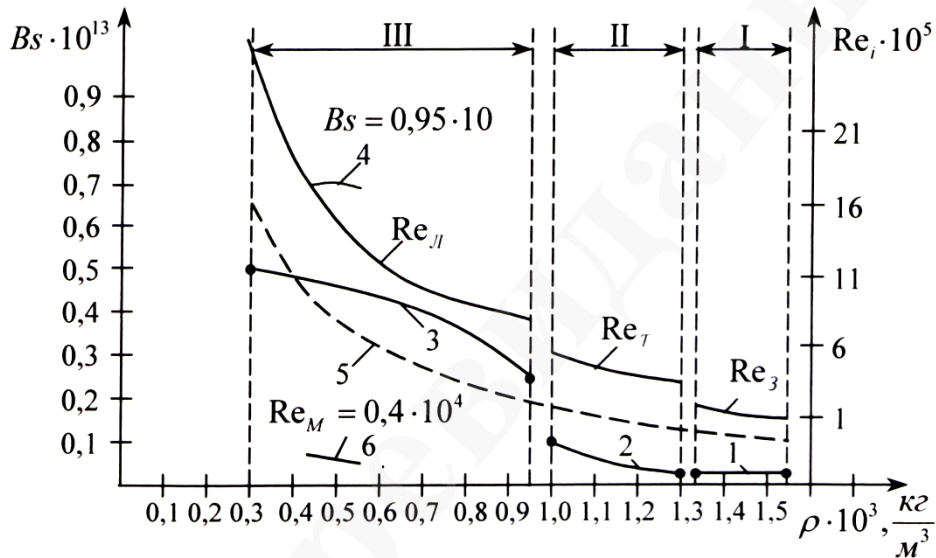


Рис. 1. Характер зміни критерію Барсукова  $Bs(\rho)$

На рис. 1 1, 2, 3 – гетерогенні компоненти суміші з постійними параметрами; 4 – борошно першого сорту; 5 – розрахунок по експериментальним даним для зерна, що надходить до елеватору (2 % домішки, 12 % вологість); I – чиста пшениця; II – важкі домішки ( $\rho \cdot 10^3 > 1,0 \cdot 10^3$ ),  $Re_{\Gamma}$  – усереднений вібраційний критерій Рейнольдса для важких домішок; III – легкі домішки ( $\rho \cdot 10^3 < 1,0 \cdot 10^3$ ),  $Re_{\Lambda}$  – усереднений вібраційний критерій Рейнольдса для легких домішок;  $Re_{3,Б}$  – усереднений вібраційний критерій Рейнольдса для чистого зерна та борошна першого сорту, відповідно

Аналіз критерію Барсукова  $Bs(\rho)$  дає підстави констатувати, що значення  $Bs$  зі зменшенням густини середовища зростає. Розрив цього функціонального зв'язку в інтервалах густин від  $(0,95-1) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  та  $(1,3-1,34) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  цілком пояснюється різницею вібраційного числа Рейнольдса  $Re_{\Gamma, \Lambda}$  для домішок. Пояснюється це тим, що домішки відрізняються від чистого зерна формою, розміром та відносною швидкістю повітря без урахування зіткнень компонент (для чистих складових криві 1, 2, 3).

#### 4. Висновки

Розроблено методику оцінки аеродинамічних параметрів на основі подібності натуральних компонент, які складають гетерогенну суміш, і виготовлених по розмірах, густині і шорсткості в масштабі 43:1 моделей, на підставі якої вперше складено ряд аеродинамічної подібності. З розрахунку натурального походження (об'єм одного зерна із середніми лінійними розмірами  $a > b > c$  (6,4 > 2,8 > 2,4 мм)  $V_n = (0,04 \div 0,41) \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$ , маса якого  $m_n = (0,30 \div 0,35) \cdot 10^{-4} \text{ кг}$ , знаходилася густина одного зерна (натурального)  $\rho_n = 0,875 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . При об'ємі моделі  $V_m = 0,34 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$  густина маси для виготовлення моделі з поліуретану складала  $\rho_m = 818 \text{ кг/м}^3$ . За результатами продувки моделей компонент у малій аеродинамічній трубі, обладнаній аеродинамічними трикомпонентними вагами, отримані дані для визначення опору, повздовжнього моменту та піднімальної сили.

Удосконалено загальну теорію гетерогенних вихрових потоків за допомогою запропонованого критерію зовнішнього збурення – критерію Барсукова, який враховує опір вихрового силового поля та амплітудно-частотний енергетичний рівень.

Розроблено диференціальні зв'язки зміни енергетичних рівнів полідисперсних гетерогенних потоків з набігаючим однокомпонентним потоком із заданими амплітудно-частотними параметрами для визначення найвигідніших газодинамічних функцій та раціональних геометричних розмірів вихрових апаратів. Уведено у математичну модель процесів газодинамічного сепарування рівняння, що описують вихрові гетерогенні потоки, вібраційний критерій Рейнольдса, на підставі якого визначаються траєкторії й енергія вихрового руху окремих компонент і ступінь поділу гетерогенних сумішей.

#### Література

1. Knaub, L., Maslich, N., Rabochaya, T. (2018). Constructing a mathematical model of the gas-dynamic separation for designing energy-saving vortex separators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (8 (94)), 32–39. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139399>
2. Knaub, L. V. (2017). Low power vortex separator heterogeneous mixtures. *Ahrarnyi Visnyk Prychornomoria*, 80, 128–137.
3. Tan, F., Karagoz, I., Avci, A. (2016). The Effects of Vortex Finder Dimensions on the Natural Vortex Length in a New Cyclone Separator. *Chemical Engineering Communications*, 203 (9), 1216–1221. doi: <http://doi.org/10.1080/00986445.2016.1160228>
4. Ellis, M., Kurwitz, C., Best, F. (2005). Development of a Unique, Passive, Microgravity Vortex Separator. *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Orlando, 763–770. doi: <http://doi.org/10.1115/imece2005-81616>
5. Sharma, R. (2000). Experimental aerodynamic characteristics of elliptical bodies with variation in ellipticity ratio. *18th Applied Aerodynamics Conference*. Denver. doi: <http://doi.org/10.2514/6.2000-4505>

6. Hu, J. C., Zhou, Y. (2008). Aerodynamic Characteristics of Asymmetric Bluff Bodies. *Journal of Fluids Engineering*, 131 (1). doi: <http://doi.org/10.1115/1.2979229>
7. Desai, R., Sajjan, P. (2019). Spiral grain separator: A post harvest technology in soybean production. *Asian Journal of Home Science*, 14 (1), 72–75. doi: <http://doi.org/10.15740/has/ajhs/14.1/72-75>
8. Hubenia, O. O., Sukhenko, Yu. H., Bondarenko, O. A., Stepchenko, V. V. (2012). Efektyvne separuvannia zerna pered lushchenniam. *Udoskonalennia protsesiv i obladnannia – zaporuka innovatsiinoho rozvytku kharchovoi promyslovosti*. Kyiv: NUKhT, 87–89.
9. Pyven, M. V. (2017). Efficiency of the grain mixtures separation performed by flat vibration sieves with looseners. *Engineering of nature management*, 2 (8), 38–44.
10. Knaub, L. V. (2003). *Hazodynamycheskye protsessy v vykhrevykh apparatakh*. Odessa: Astroprint, 276.