

Вісник Криворізького національного університету

Том 22, № 2

Заснований у 2003 році
Видається два рази на рік

Кривий Ріг
2024

Засновник:
Криворізький національний університет

Рекомендовано до друку та поширення
через мережу Інтернет Вченою радою
Криворізького національного університету
(протокол № 6 від 24 грудня 2024 р.)

Державна реєстрація:
Ідентифікатор медіа R30-04965.
Рішення Національної ради України з питань телебачення
і радіомовлення № 1501, протокол № 15 (09.05.2024) р.)

Науковий журнал включено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України.
Спеціальності: 121 – Інженерія програмного забезпечення, 122 – Комп'ютерні науки, 123 – Комп'ютерна інженерія, 124 – Системний аналіз, 131 – Прикладна механіка, 133 – Галузеве машинобудування, 136 – Металургія, 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, 144 – Теплоенергетика, 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 184 – Гірництво, 192 – Будівництво та цивільна інженерія, 193 – Геодезія та землеустрій, 263 – Цивільна безпека, 274 – Автомобільний транспорт, 275 – Транспортні технології (за видами), 071 – Облік і оподаткування, 072 – Фінанси, банківська справа, страхування та фондовий ринок, 073 – Менеджмент, 076 – Підприємництво та торгівля, 281 – Публічне управління та адміністрування
(наказ МОН України від 17 березня 2020 року № 409)

Журнал індексується в наукометричних базах даних
UCSB Library, Crossref, Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського (НБУВ), Google Академія, Litmaps, Інститут проблем реєстрації інформації Національної академії наук України, Ulrichsweb, Бібліотека Університету Осло, Бібліотека Університету Халла, Бібліотека Лейпцизького університету (UBL), Open Ukrainian Citation Index (OUCI)

Контактна адреса:
Криворізький національний університет
50027, вул. В. Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна
E-mail: info@journal-knu.com.ua
<https://journal-knu.com.ua/uk>

Journal of Kryvyi Rih National University

Volume 22, No. 2

Year of foundation: 2003
Frequency: 2 times a year

Kryvyi Rih
2024

ISSN 2306-5451
e-ISSN 2519-2736

DOI: 10.31721/2306-5451-2024-2-22

Founder:
Kryvyi Rih National University

Recommended for printing and distribution
via the Internet by the Academic Council
of Kryvyi Rih National University
(Minutes No. 6 of December 24, 2024)

State Registration:
Media identifier R30-04965.
Decision of the National Council of Television and Radio Broadcasting
of Ukraine No. 1501, Minutes No. 15, dated 09.05.2024

The scientific journal is included in category "B" of the List of scientific specialised publications of Ukraine.
Specialties: 0411 – Accounting and taxation, 0412 – Finance, banking and insurance, 0413 – Management and administration, 0416 – Wholesale and retail sales, 0532 – Earth sciences, 0612 – Database and network design and administration, 0613 – Software and applications development and analysis, 0688 – Inter-disciplinary programmes and qualifications involving Information and Communication Technologies, 0713 – Electricity and energy, 0714 – Electronics and automation, 0715 – Mechanics and metal trades, 0716 – Motor vehicles, ships and aircraft, 0724 – Mining and extraction, 0732 – Building and civil engineering, 1032 – Protection of persons and property, 1041 – Transport services
(order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 409, dated March 17th, 2020)

The journal is indexed in databases
UCSB Library, Crossref, Vernadsky National Library of Ukraine (VNLU), Google Scholar, Litmaps, Institute of Information Registration Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ulrichsweb, University of Oslo Library, University of Hull Library, Leipzig University Library (UBL), Open Ukrainian Citation Index (OUCI)

Address for contacts:
Kryvyi Rih National University
50027, 11 Vitalii Matusevich Str., Kriviy Rih, Ukraine
E-mail: info@journal-knu.com.ua
<https://journal-knu.com.ua/en>



ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

Микола Ступнік	Ректор, доктор технічних наук, професор, академік Гірничої академії наук України, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
----------------	---

НАЦІОНАЛЬНІ ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ

Дмитро Бровко	Доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи, доцент кафедри будівельних геотехнологій, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Альберт Азарян	Доктор технічних наук, професор, професор кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Анатолій Березовський	Доктор геологічних наук, професор, професор кафедри геології та екології, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Лариса Варава	Доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри менеджменту і адміністрування, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Юрій Вілкул	Доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії в області науки і техніки, голова наглядової ради університету, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Георгій Губін	Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва, член Академії гірничих наук України, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Сергій Жуков	Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри відкритих гірничих робіт, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Олена Зінченко	Доктор економічних наук, професор, професор кафедри фінансів суб'єктів господарювання та інноваційного розвитку, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Всеволод Калініченко	Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри підземної розробки родовищ корисних копалин, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Віктор Ковальчук	Доктор технічних наук, професор, професор кафедри економіки, організації та управління підприємствами, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Ігор Котов	Доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Микола Кіяновський	Доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології машинобудування, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Андрій Купін	Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Олександр Лапшин	Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Юрій Монастирський	Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Володимир Моркун	Доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних наук, автоматики та систем управління, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Тетяна Олійник	Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри збагачення корисних копалин і хімії, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Альона Паламар	Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Володимир Перегудов	Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геодезії, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Андрій Пікільняк	Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Сергій Савельєв	Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Олег Сінчук	Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна



Редакційна колегія

Віктор Сидоренко	Доктор технічних наук, професор, професор кафедри геодезії, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, академік Гірничої академії наук України, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Алла Ткаченко	Доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри підприємництва, торгівлі та біржової діяльності, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна
Станіслав Толмачов	Доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханіки, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Анатолій Турило	Доктор економічних наук, професор, професор кафедри фінансів суб'єктів господарювання та інноваційного розвитку, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Олександр Учитель	Доктор технічних наук, професор, професор кафедри електричної інженерії та автоматизації, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Павло Федоренко	Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри маркшейдерії, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Альона Шахно	Доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри економіки, організації та управління підприємствами, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Олександр Шишкін	Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології будівельних виробів, матеріалів та конструкцій, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна
Вадим Щокін	Доктор технічних наук, професор, директор Науково-дослідного гірничо-рудного інституту, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна

МІЖНАРОДНІ ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ

Раджендран Шобга Аджин	Кандидат наук про Землю і планети, дослідник, Флорентійський університет, м. Флоренція, Італія
Дмитро Зубов	Доктор технічних наук, професор, Університет Центральної Азії, м. Нарин, Киргизстан
Ніколае Ільяс	Доктор технічних наук, професор, Університет Петрошані, м. Петрошань, Румунія

Editorial Board



EDITOR-IN-CHIEF

Mykola Stupnik	Rector, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of Mining Sciences Academy in Ukraine, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
----------------	---

NATIONAL MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD

Dmytro Brovko	Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research, Associate Professor of the Department of Construction Geotechnology, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Albert Azaryan	Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Modelling and Software, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Anatoliy Berezovsky	Doctor of Geological Sciences, Professor, Professor of the Department of Geology and Ecology, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Larysa Varava	Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Management and Administration, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Yuriy Vilkul	Doctor of Technical Sciences, Professor, Laureate of the State Prize in Science and Technology, Chairman of the Supervisory Board of the University, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Georgiy Gubin	Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Ferrous Metallurgy and Foundry, Member of the Academy of Mining Sciences of Ukraine, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Serhii Zhukov	Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Open Pit Mining, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Olena Zinchenko	Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of Finance of Business Entities and Innovative Development, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Vsevolod Kalinichenko	Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Underground Mining, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Viktor Kovalchuk	Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Economics, Organisation and Management of Enterprises, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Igor Kotov	Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Modelling and Software, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Mykola Kiyanovskiy	Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Andrey Kupin	Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Systems and Networks, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Oleksandr Lapshin	Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Labour Protection and Civil Safety, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Yuriy Monastyrskiy	Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Motor Transport, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Vladimir Morkun	Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Science, Automation and Control Systems, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Tetyana Oliinyk	Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mineral Processing and Chemistry, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Alena Palamar	PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geodesy, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Volodymyr Peregudov	Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Geodesy, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Andrey Pikilnyak	PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Sergiy Saveliev	Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Ferrous Metallurgy and Foundry, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Oleg Sinchuk	Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automated Electromechanical Systems in Industry and Transport, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Viktor Sidorenko	Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Geodesy, Laureate of the State Prize of Ukraine in Science and Technology, Academician of the Mining Academy of Sciences of Ukraine, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine



Editorial Board

Alla Tkachenko	Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Entrepreneurship, Trade and Exchange Activities, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine
Stanislav Tolmachev	Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electromechanics, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Anatoliy Turylo	Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of Finance of Business Entities and Innovative Development, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Oleksandr Uchitel	Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering and Automation, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Pavlo Fedorenko	Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Surveying, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Alyona Shakhno	Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Economics, Organisation and Management of Enterprises, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Oleksander Shishkin	Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology of Building Products, Materials and Structures, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
Vadym Shchokin	Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Research Mining Institute, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

INTERNATIONAL MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD

Rajendran Shobha Ajin	PhD in Earth and Planetary Sciences, Researcher, University of Florence, Florence, Italy
Dmytro Zubov	Doctor of Technical Sciences, Professor, University of Central Asia, Naryn, Kyrgyzstan
Nikolae Ilias	Doctor of Technical Sciences, Professor, University of Petrosani, Petrosani, Romania

**О. Воловецький**

Комплексна методологія створення розширених датасетів
для моделювання процесу магнітної сепарації залізної руди 10

O. Volovetskyi

Comprehensive methodology for creating enhanced datasets
for modelling the process of magnetic separation of iron ore 10

Є. Савчук

Огляд перспективних досліджень у галузі переробки твердих побутових відходів
для подальшого використання як твердопаливних матеріалів 28

Ye. Savchuk

Overview of promising research in the field of solid waste recycling
for further use as solid fuel materials 28

С. Сахно, Л. Янова, О. Пищикова, В. Козаріз

Оцінка якості мікроклімату в кабіні екскаватора ЕКГ-12К 37

S. Sakhno, L. Yanova, O. Pyshchykova, V. Kozariz

Assessment of the quality of the microclimate in the EKG-12K excavator cab 37

Ф. Рахімлі, Н. Мамєдова

Оптимізація технологічних параметрів для покращення десульфурації
в процесі переробки пропан-пропілену 48

F. Rahimli, N. Mamedova

Optimisation of process parameters for improved desulphurisation
in propane-propylene processing 48

В. Савін, П. Кіріченко

Оптимізація повітрообміну в термомодернізованих будівлях за допомогою природної вентиляції 60

V. Savin, P. Kirichenko

Optimisation of air exchange in thermally modernised buildings by means of natural ventilation 60

Технічні нотатки / Technical notes**Д. Кравцова, У. Зюган, А. Фраймович**

Оптимізація енергоефективності сонячних панелей математичними методами
з комп'ютеризацією розрахунків 68

D. Kravtsova, U. Ziuhan, A. Fraimovych

Solar panels' energy efficiency optimisation using mathematical methods
with computerisation of calculations 68

А. Хруцький, М. Франузо

Аналіз співвідношення сил, що діють на матеріал у повітряному відцентровому сепараторі 73

A. Khrutskiy, M. Franuzo

Analysis of the relationship of forces acting on the material in the centrifugal air separator 73



Analysis of the relationship of forces acting on the material in the centrifugal air separator

Andrii Khrutskiy*

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Kryvyi Rih National University
50027, 11 Vitalii Matusevich Str., Kryvyi Rih, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9332-1748>

Maksym Franuzo

Postgraduate Student
Kryvyi Rih National University
50027, 11 Vitalii Matusevich Str., Kryvyi Rih, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0003-4354-0875>

Abstract. The relevance of the study derives from the need to increase efficiency of dry beneficiation of minerals, in particular through improving methods of separation of finely dispersed materials. The research aimed to analyse the regularities of the relationship of forces acting on a material particle in the vortex airflow in the centrifugal separator. The paper uses the analytical research method and generalisation of existing studies dealing with determining the balance of forces acting on a material particle in a vortex airflow. The main results of the research consist in determining the dependencies between the most influential forces acting on a particle of a mineral with a relatively high density in a centrifugal air separator. The balance of the airflow resistance, gravity and centrifugal forces was established, which is a key aspect for improving designs and optimising operating modes of centrifugal separators. The dependencies determining positions of resultants of the main forces were established and allowed determining parameters of the rational operating mode of air separators and substantiating recommendations for improving efficiency of their operation. The obtained equations of the resultants are universal and do not depend on the specific design of the air separator, which allows them to be used to analyse and optimise operation of various models of centrifugal air separators as well as other classes of separators considering relevant adjustments. The practical value of the work consists in obtaining equations that determine positions of the resultants of the three main forces acting on a particle in the vortex airflow. This, in turn, enables determining parameters of the required mode of operation

Keywords: mineral beneficiation; centrifugal force; gravity force; airflow resistance force; balance of forces

Introduction

The problem of efficient sorting of fine-grade materials is becoming increasingly relevant in modern environment, when mineral beneficiation technologies require high process precision and optimality. Improvement of material separation methods is of crucial significance

for increasing productivity and economic efficiency of mining and beneficiation enterprises. Employment of centrifugal air separators is of particular importance as they provide high efficiency of dry separation of finely dispersed materials, replacing inefficient screening.

Suggested Citation:

Khrutskiy, A., & Franuzo, M. (2024). Analysis of the relationship of forces acting on the material in the centrifugal air separator. *Journal of Kryvyi Rih National University*, 22(2), 73-78. doi: 10.31721/2306-5451-2024-2-22-73-78.



This equipment is becoming indispensable in conditions of increased application of dry mineral processing technologies instead of wet processing to reduce energy costs.

Sorting by centrifugal separators is an important operation, especially for materials with a high content of less than 0.1-0.5 mm fractions. However, efficiency of this equipment depends on understanding and considering the complex of forces acting on the material particles, in particular the centrifugal force, the airflow resistance force and weight. Improvement of these technologies requires detailed mathematical modelling to optimise separation processes. In current studies of centrifugal separators, much attention is paid to the analysis of forces that act on material particles. In particular, most researchers (Adamchuk *et al.*, 2021; Esmailpoura *et al.*, 2024) distinguish three main forces: particle weight, the airflow resistance force, and the centrifugal force. M. Madaliev (2020) presents differential equations that describe the motion of particles in vortex flows. The author notes that the centrifugal force and the airflow resistance force are the main forces that determine the trajectory of particles. S. Stepanenko (2019) provides formulas for determining these forces, but their application is complicated due to the need to determine additional coefficients. The above authors point out that mathematical modelling of such processes is critical for optimising operation of separators. S. Stepanenko & B. Kotov (2020) further highlight the lifting force generated by the Magnus-Zhukovsky effect, which acts in the direction opposite to the force of gravity. Thus, a comprehensive approach to modelling and consideration of all forces acting on particles is necessary to improve efficiency of the process.

The present work aimed to build mathematical models to determine prevailing forces influencing efficiency of material separation and to substantiate recommendations for improving process performance.

Materials and Methods

Specific features of the research object condition application of the analytical method when the research focuses not on a specific design, but only on the model of the separation process and its parameters. When considering movement of a single material particle in the vortex airflow, the following assumptions are made: the particle is a solid undeformed ball-shaped body, its density is $\rho_p = 3,500 \text{ kg/m}^3$ (that corresponds to the density of iron-containing concentrates), the radius of the circle of the particle movement is accepted $r = 0.5 \text{ m}$, the airflow has a uniform velocity field.

The following factors act on a single particle in the spiral flow vortex (Fig. 1):

▼ the particle weight (the vector is in the downward direction):

$$G = g \cdot m_p, \quad (1)$$

where m_p – the particle mass, kg; g – the free fall acceleration, m/s^2 .

▼ the airflow resistance force, N (the vector is directed collinearly with the air velocity vector):

$$P_a = c_r \cdot k_s \cdot \rho_a \cdot v_t^2 \cdot \pi \cdot \frac{d_p^2}{8}, \quad (2)$$

where c_r – the coefficient of the airflow resistance of the particle; k_s – the coefficient that depends on the particle shape ($k_s = 1$ – for ball-shaped; $k_s = 1.1$ – for oval; $k_s = 1.5$ – for pyramidal; $k_s = 1.76$ – for longitudinal; $k_s = 3.8$ – for acicular ones); d_p – the equivalent diameter of the particle, m; ρ_a – air density, kg/m^3 ; v_t – the tangential air velocity component.

▼ the centrifugal force, N (the vector is in the radial direction from the centre):

$$P_c = \frac{\pi \cdot \rho_p \cdot v_t^2 \cdot d_p^3}{6 \cdot r}, \quad (3)$$

where ρ_p – the density of the particle material, kg/m^3 ; r – the radius of the particle location, m.

▼ the medium resistance force during the radial movement of the particle from the vortex centre, N :

$$P_r = \frac{C \cdot F_p \cdot \rho_p \cdot v_p^2}{2 \cdot g}, \quad (4)$$

where C – the factor depending on Reynolds number ($C = 0.48$ for $Re = 1000 \dots 200000$) of the airflow resistance of the particle; F_p – the particle cross-section area, m^2 ; v_p – the speed of the particle's radial movement from the vortex centre.

v_p is determined as:

$$v_p = \frac{d_p^2 \cdot \rho_p \cdot v_r^2}{18 \cdot \nu \cdot \rho_a \cdot r}, \quad (5)$$

where v_r – the radial component of the air velocity, m/s ; ν – the kinematic viscosity of air ($\nu = 1.5 \cdot 10^{-5}$), m^2/s .

▼ the kinematic lifting force, N (the vector is in the opposite direction to gravity):

$$P_{kl} = \frac{m_p \cdot g \cdot \rho_a}{\rho_p}. \quad (6)$$

▼ the friction force of particles on the curvilinear surface of the separator housing, N (the vector is in the opposite direction to the airflow resistance force vector):

$$P_{fr} = k \cdot P_c, \quad (7)$$

where k – the coefficient of friction of the particle on the separator housing wall.

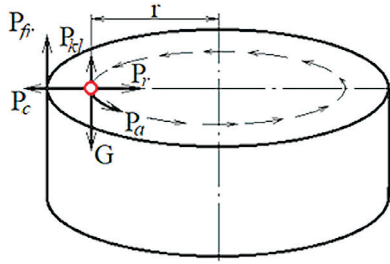


Figure 1. Forces acting on a material particle in the vortex airflow

Source: developed by the authors

Results and Discussion

The values of the forces acting on the particle under the same conditions are compared using the dependencies presented in the above methodology (Fig. 2).

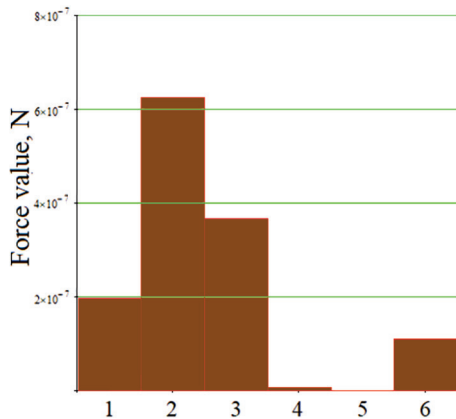


Figure 2. Comparison of the forces acting on the particle in the centrifugal separator under the same conditions

Notes: 1 – the particle weight G ; 2 – the airflow resistance force P_a ; 3 – the centrifugal force P_c ; 4 – the medium resistance force during the radial movement of the particle from the vortex centre P_r ; 5 – the hydrodynamic force P_{kl} ; 6 – the friction force P_{fr}

Source: developed by the authors

Figure 2 demonstrates that the hydrodynamic force and the medium resistance force during the radial movement of the particle are the smallest in comparison with the others. It should be noted that the relationship of the most influential forces of gravity, airflow resistance and the centrifugal force can vary significantly because they depend on the size and mass of the particles, the radius of their location inside the separator and the air velocity.

In the further force analysis, the hydrodynamic force and the medium resistance force during the radial movement of the particle are not considered due to their relatively small values. In addition, the force of particle friction on the curvilinear

surface of the separator housing is not considered either because the present work deals with movement of the particles in the airflow before their contact with the walls of the separator housing.

Analysing the three most influential forces acting on a particle in a centrifugal separator, it should be noted that their values depend on the size, weight (density) of the particle, the air velocity and the current radius of the particle's location inside the centrifugal separator. Therefore, this dependency cannot be plotted in its entirety because it is a hypersurface. The relationship of the three most influential forces acting on a particle is shown in Figure 3.

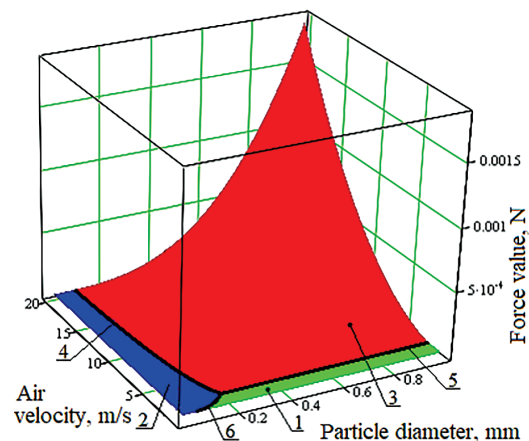


Figure 3. Relationship of the forces acting on a particle depending on its diameter and speed at the location radius of 0.5 m

Notes: 1 – the particle weight G ; 2 – the airflow resistance force P_a ; 3 – the centrifugal force P_c ; 4 – the resultant of the airflow resistance P_a and centrifugal P_c forces; 5 – the resultant of the centrifugal force P_c and the particle weight G ; 6 – the resultant of the airflow resistance force P_a and the particle weight G

Source: developed by the authors

Figure 3 shows that as the size and, accordingly, the weight of the particle and the air velocity increase, the centrifugal force becomes dominant. At low air velocities, the force of gravity is dominant. Finally, at small particle sizes and, accordingly, their weight, it is the airflow resistance force that dominates.

Special attention should be paid to the position of the resultants. The position of the resultant of the air resistance force and the centrifugal force determines the boundary of the material separation by size in centrifugal separators. Positions of the resultant of the airflow resistance force and the particle weight determine the boundary of the material separation by size in gravity separators. Based on (1) and (3), the equation of the projection of the resultant of the centrifugal force and the particle weight (Fig. 4) looks like:

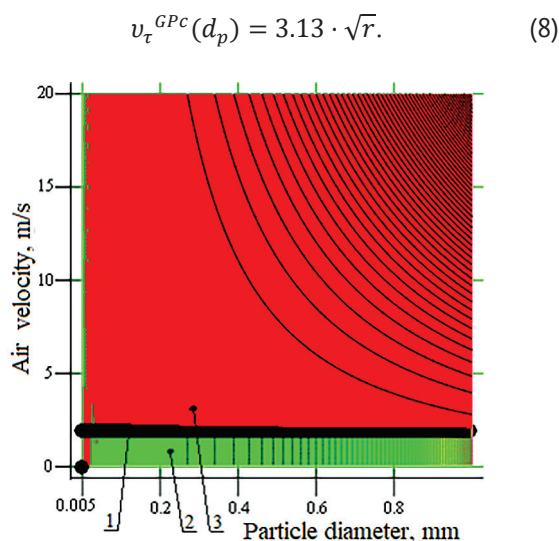


Figure 4. Projection of the resultant of the centrifugal force and the particle weight

Notes: 1 – the resultant; 2 – the particle weight G ; 3 – the centrifugal force P_c

Source: developed by the authors

Then the condition of the centrifugal force exceeding the weight of the material particle looks like:

$$P_c > G, \text{ if } v_{\tau} > 3.13 \cdot \sqrt{r}. \quad (9)$$

It should be noted that the position of the resultant does not depend on the air velocity and is determined only by the radius of the particle location. Based on (1) and (2), the equation of the projection of the resultant of the airflow resistance force and the particle weight (Fig. 5) looks like:

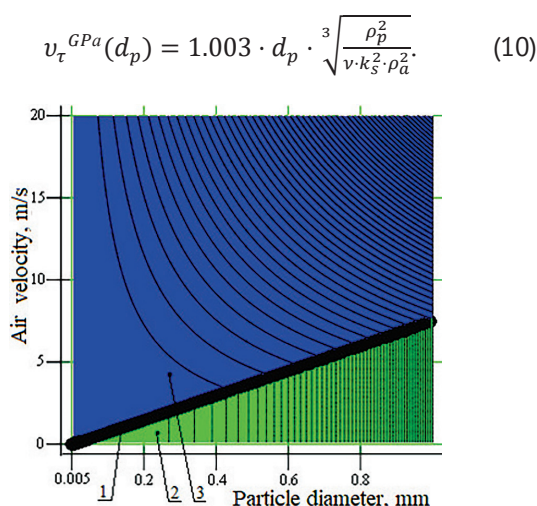


Figure 5. Projection of the resultant of the airflow resistance force and the particle weight

Notes: 1 – the resultant; 2 – the particle weight G ; 3 – the airflow resistance force P_a

Source: developed by the authors

Then the condition of the airflow resistance force exceeding the material particle weight looks like:

$$P_a > G, \text{ if } v_{\tau} > 1.003 \cdot d_p \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_p^2}{v \cdot k_s^2 \cdot \rho_a^2}}. \quad (11)$$

The position of the resultant of the airflow resistance force and the particle weight is determined by the linear dependency and additionally depends on the density of material particles. Based on (2) and (3), the equation of the projection of the resultant of the airflow resistance force and the centrifugal force (Fig. 6) looks like:

$$v_{\tau}^{PcPa}(d_p) = \frac{95.0625 \cdot r^2 \cdot v \cdot k_s^2 \cdot \rho_a^2}{d_p^3 \cdot \rho_p^2}. \quad (12)$$

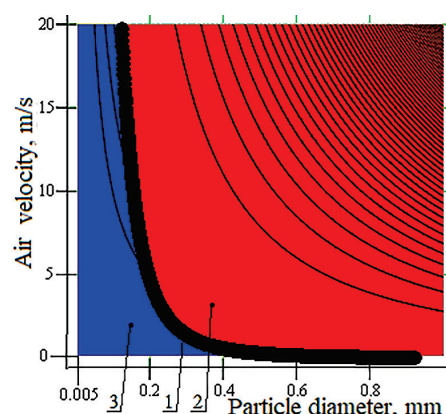


Figure 6. Projection of the resultant of the airflow resistance force and the centrifugal force

Notes: 1 – the resultant; 2 – the centrifugal force P_c ; 3 – the airflow resistance P_a

Source: developed by the authors

Then the condition of the centrifugal force exceeding the airflow resistance force looks like:

$$P_c > P_a, \text{ if } v_{\tau} > \frac{95.0625 \cdot r^2 \cdot v \cdot k_s^2 \cdot \rho_a^2}{d_p^3 \cdot \rho_p^2}. \quad (13)$$

The performed analysis of the relationship of the acting forces confirms the conclusion made by K.W. Chu *et al.* (2011) that the centrifugal, gravity and airflow resistance forces are the predominant ones acting on a particle. The obtained conditions of positioning the resultant of the main forces acting on material particles in centrifugal separators enable quick determination of the required air velocity depending on the size of the separator and parameters of the processed material. The fact that the obtained equations do not depend on the specific design of the separator allows using them for analysing the entire class of centrifugal air separators, and, with some adjustments, other classes of air separators.

N.X. Ho *et al.* (2024) consider the influence of the additional medium resistance force which acts on the particle during its movement in the curvilinear flow.

This aspect differs from previous studies, in which this force was not taken into account. Interestingly, at low particle density and relatively large sizes, which are characteristic of agricultural but not mineral materials, the kinematic lifting force becomes more influential, as shown in the work by B. Kotov *et al.* (2019). Y. Zeng *et al.* (2020) and R. Shen *et al.* (2022) additionally mention the force of particle friction on the separator wall, which appears when the material comes into contact with the equipment housing. The work by N. Morkun *et al.* (2022), that dealt with the modelling and control of magnetic separator parameters, should also be considered in this connection.

Moreover, the airflow resistance force value depends more on the air velocity and particle size, and the centrifugal force value depends on the particle weight and location. Thus, closer to the axis of the separator, the centrifugal force prevails for heavy particles and pushes them outward to the housing wall; the airflow resistance force predominates for smaller particles with low mass and pick them up and carries them out for discharge. At that, as can be seen from the above graphs, to provide normal operation of centrifugal air separators with particles of large mass and size, the airflow velocity should be relatively high. This again confirms that centrifugal air separators operate more efficiently with small-sized particles of up to 0.1...0.5 mm.

Conclusions

The analysis performed has resulted in identifying regularities of the relationship of forces acting on particles of dense materials, such as mineral raw materials, and determining their trajectories and behaviour in the vortex airflow of the centrifugal separator. It has been established that the most influential forces are

gravity, airflow resistance and centrifugal ones. The balance between them is determined by the particle size and mass (density), the air velocity and the current radius of the particle location in the separator. Thus, for heavy particles located closer to the separator axis, the centrifugal force prevails and pushes them outward to the housing wall; for smaller particles with low mass, the airflow resistance force predominates and picks them up and carries out for discharge. So, to provide normal operation of centrifugal air separators with particles of large mass and size, the airflow velocity should be relatively high.

The dependencies have been established that identify positions of the resultants of the main forces and allow determining parameters of the rational mode of operation of air separators and substantiating the recommendations for improving their efficiency. The obtained equations of the resultants are universal and do not depend on the specific design of the air separator, which allows them to be used to analyse and optimise operation of various models of centrifugal air separators, as well as other classes of separators considering relevant adjustment. Prospects for further research consist in determining designs of centrifugal air separators with the best balance of the three mentioned forces, which will contribute to increased efficiency of separation of finely dispersed mineral raw materials, as well as determination of possible ways to improve the separator design.

Acknowledgements

None.

Conflict of Interest

None.

References

- [1] Adamchuk, V., Bulgakov, V., Ivanov, S., Holovach, I., & Ihnatiev, Ye. (2021). Theoretical study of pneumatic separation of grain mixtures in vortex flow. In *Engineering for rural development* (pp. 657-664). Jelgava: Latvia University of Life Sciences and Technologies. [doi: 10.22616/ERDev.2021.20.TF139](https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF139).
- [2] Chu, K.W., Wang, B., Xu, D.L., Chen, Y.X., & Yu, A.B. (2011). CFD-DEM simulation of the gas-solid flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*, 66(5), 834-847. [doi: 10.1016/j.ces.2010.11.026](https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.11.026).
- [3] Esmailpoura, M., Mohebbia, A., & Ghalandarib, V. (2024). CFD simulation and optimization of an industrial cement gas-solid air classifier. *Particuology*, 89, 172-184. [doi: 10.1016/j.partic.2023.10.011](https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.10.011).
- [4] Ho, N.X., Dinh, H.T., Dau, N.T., & Nguyen, B.H. (2024). A numerical study on the flow field and classification performance of an industrial-scale micron air classifier under various outlet mass airflow rates. *Processes*, 12(9), article number 2035. [doi: 10.3390/pr12092035](https://doi.org/10.3390/pr12092035).
- [5] Kotov, B., Hryshchenko, V., Pantsyr, Yu., & Herasymchuk, I. (2019). Modeling of dust inertial separation by centrifugal and electric field in the installation cyclone-type. *Energy and Automation*, 6, 14-26. [doi: 10.31548/energiya2019.06.014](https://doi.org/10.31548/energiya2019.06.014).
- [6] Madaliev, M. (2020). Numerical calculation of an air centrifugal separator based on the SARC turbulence model. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 6(SI), 1133-1140. [doi: 10.22055/JACM.2020.31423.1871](https://doi.org/10.22055/JACM.2020.31423.1871).
- [7] Morkun, N., Tron, V., Serdyuk, O., Gaponenko, A., Hryshchenko, S., & Bobrov, Ye. (2022). Determination of pulp parameters in the working chamber of the magnetic separator based on the assessment of the process of Lamb wave propagation. *Mining Journal of Kryvyi Rih National University*, 20(1), 172-177. [doi: 10.31721/2306-5435-2022-1-110-172-177](https://doi.org/10.31721/2306-5435-2022-1-110-172-177).

- [8] Shen, R., He, P., Yoriya, S., Chen, N., Wu, J., Hu, T., He, K., & Cai, Q. (2024). Simulation analysis of cyclone separator for separation of cenospheres. *Applied Sciences*, 14(12), article number 5132. doi: [10.3390/app14125132](https://doi.org/10.3390/app14125132).
- [9] Stepanenko, S. (2019). Analytical studies of the curvilinear channel technological parameters of the pneumatic separator. *Mechanisation and Electrification of Agriculture*, 10(109), 75-83. doi: [10.37204/0131-2189-2019-10-8](https://doi.org/10.37204/0131-2189-2019-10-8).
- [10] Stepanenko, S., & Kotov, B. (2020). Main theoretical provisions of grain material separation in air channels with unequal air flow speed. *Design, Production and Exploration of Agricultural Machines*, 50, 122-133. doi: [10.32515/2414-3820.2020.50.122-133](https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.122-133).
- [11] Zeng, Y., Zhang, S., Zhou, Y., & Li, M. (2020). Numerical simulation of a flow field in a turbo air classifier and optimization of the process parameters. *Processes*, 8(2), article number 237. doi: [10.3390/pr8020237](https://doi.org/10.3390/pr8020237).

Аналіз співвідношення сил, що діють на матеріал у повітряному відцентровому сепараторі

Андрій Хруцький

Кандидат технічних наук, доцент
Криворізький національний університет
50027, вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9332-1748>

Максим Франузо

Аспірант
Криворізький національний університет
50027, вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна
<https://orcid.org/0009-0003-4354-0875>

Анотація. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності процесів сухого збагачення корисних копалин, зокрема через вдосконалення методів поділу тонкодисперсних матеріалів. Метою дослідження був аналіз закономірностей співвідношення сил, що діють на частинку матеріалу у вихровому повітряному потоці у відцентровому сепараторі. У роботі використано аналітичний метод дослідження та узагальнення існуючих досліджень, орієнтованих на визначення балансу сил, що діють на частинку матеріалу в вихровому потоці повітря. Основні результати дослідження полягають у визначенні залежностей між найвпливовішими силами, що діють на частинку мінеральної сировини, що відрізняється порівняно високою щільністю, у відцентровому повітряному сепараторі. Встановлений баланс між силою аеродинамічного опору, силою тяжіння і відцентровою силою, який є ключовим аспектом для вдосконалення конструкцій та оптимізації режимів роботи відцентрових сепараторів. Встановлено залежності, що визначають положення рівнодіючих між основними силами, та дозволяють визначати параметри раціонального режиму роботи повітряних сепараторів та обґрунтувати рекомендації щодо підвищення продуктивності процесу їх роботи. Отримані рівняння положення рівнодіючих є універсальними та не прив'язані до конкретної конструкції повітряного сепаратора, що дозволяє застосовувати їх для аналізу та оптимізації роботи різноманітних моделей відцентрових повітряних сепараторів, а також інших класів сепараторів з урахуванням відповідних уточнень. Практична цінність роботи полягає в отриманні рівнянь, які визначають положення рівнодіючих між трьома основними силами, що діють на частинку у вихровому повітряному потоці. Це, в свою чергу, дозволяє визначати параметри необхідного режиму роботи

Ключові слова: збагачення корисних копалин; відцентрова сила; сила тяжіння; сила аеродинамічного опору; баланс сил

Вісник Криворізького національного університету

Том 22, № 2
2024

Заснований у 2003 р.
Виходить два рази на рік.

Редагування англomовних текстів:
С. Воровський

Відповідальний редактор:
С. Тіхлівець

Редагування бібліографічних списків:
С. Тіхлівець

Комп'ютерна верстка:
О. Глінченко

Підписано до друку з оригінал-макета 24.12.2024
Ум. друк. арк. 9,3
Наклад 100 прим.

Контактна адреса:
Криворізький національний університет
50027, вул. В. Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна
Тел.: +38 (056) 409-06-06
E-mail: info@journal-knu.com.ua
<https://journal-knu.com.ua/uk>

Journal of Kryvyi Rih National University

Volume 22, No. 2
2024

Founded in 2003.
Published 2 times per year.

Editing English-Language Texts:
S. Vorovsky

Managing Editor:
S. Tikhlivets

Editing Bibliographic Lists:
S. Tikhlivets

Desktop Publishing:
O. Glinchenko

Signed to the print with the original layout 24.12.2024
Conventional Printed Sheet 9.3
Circulation 100 copies

Address for contacts:
Kryvyi Rih National University
50027, 11, Vitalii Matusevich str., Krivyi Rih, Ukraine
Tel.: +38 (056) 409-06-06
E-mail: info@journal-knu.com.ua
<https://journal-knu.com.ua/en>