

Н. С. ПРЯДКО, О. Д. ІГНАТЬЄВ, Г. М. ШЕВЕЛЬОВА, К. В. ТЕРНОВА

КЕРУВАННЯ ГАЗОМАСОПОТОКАМИ В СТРУМИННОМУ ОБЛАДНАННІ

*Інститут технічної механіки**Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Леишко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: ai2325434@gmail.com*

У даній роботі на основі чисельного моделювання газових потоків в ежекторному вузлі та аналізу акустичних сигналів помольної камери показані шляхи підвищення ефективності газоструминного подрібнення. Для запобігання зносу розгінної трубки ежектора та одержання продукту подрібнення без домішок досліджено вплив підводу додаткового потоку енергоносія на картину течії в розгінній трубці струминного млина. Проведено порівняльний аналіз зміни структури течії в ежекторі в залежності від наявності додаткового підводу і форми розгінної трубки. Показано, що використання конічного насадка дозволяє отримати більш рівномірний потік на виході з ежектора. Завдяки додатковому підведенню енергоносія досягається рівномірне підвищення швидкості потоку та зменшення зносу стінок розгінної трубки. Встановлено зв'язок акустичних сигналів робочих зон млина з технологічними параметрами процесу струминного подрібнення. На цій базі розроблено метод контролю якості продуктів подрібнення. Запропоновано методику визначення крупності матеріалу в потоці енергоносія за результатами акустичного моніторингу процесу, яка використовує встановлену залежність дисперсії характерної частоти акустичних сигналів від маси відповідної фракції суміші при транспортуванні матеріалу в потоці. Представлена методика дозволяє прискорити процес визначення крупності матеріалу та підвищити якість готового продукту подрібнення. Розроблено систему автоматичного керування процесом подрібнення на основі керування процесом завантаження за характеристиками акустичних сигналів зони подрібнення. Створено діючу модель керованого бункера завантаження газоструминного млина. Працездатність системи керування перевірено на імітаційній моделі, що включає модель об'єкту керування (млина) та системи керування. Показано, що система автоматичного керування завантаженням млина за характеристиками акустичних сигналів зони подрібнення дає змогу підвищити продуктивність млина до 10 %, що перевірено в промислових умовах Вільногірського гірничо-металургійного комбінату.

Ключові слова: газоструминний млин, сопло, ежектор, акустичні сигнали, продуктивність, керування.

Based on a numerical simulation of gas flows in an ejector unit and an analysis of grinding chamber acoustic signals, this paper shows ways to increase the efficiency of jet grinding. To prevent ejector speed-up tube wear and to obtain a ground product without impurities, the effect of feeding an additional energy carrier flow on the flow pattern in the speed-up tube of a jet mill was studied. A comparative analysis of the ejector flow pattern as a function of the presence of an additional feed and the speed-up tube shape was carried out. It was shown that the use of a conical nozzle offers a more uniform flow at the ejector outlet. The additional energy carrier feed provides a uniform increase in flow speed and reduces speed-up tube wall wear. The acoustic signals of the mill working zones were related to the jet grinding process parameters, around which a ground product quality control method was developed. The paper presents a technique for determining the material particle size in the energy carrier flow from the results of acoustic monitoring of the process. The technique uses the established relationship between the dispersion of the acoustic signal characteristic frequency and the mass of the corresponding fracture of the mixture in in-flow material transportation. The technique speeds up material particle size determination and improves the finished product quality. An automatic system was developed to control the grinding process by controlling the loading process according to the characteristics of the grinding zone acoustic signals. An operating model of a controlled hopper of a gas jet mill was made. The operability of the control system was verified on a simulation model, which includes a control object (mill) model and a control system model. It was shown that the system of mill loading automatic control by the characteristics of the grinding zone acoustic signals offers an up to 10 percent increase in mill capacity, which was verified in industrial conditions at Vilnohorsk Mining and Metallurgical Plant.

Keywords: gas jet mill, nozzle, ejector, acoustic signals, efficiency, control.

Вступ. Ефективність керування комплексом газоструминного подрібнення млин-класифікатор визначається якістю інформації про його технологічні параметри (продуктивність і властивості вхідного постачання, ступеня заповнення млина, циркуляційного навантаження та гранулометричного складу вхідної руди і готового продукту тощо) і конструктивними особливостями обладнання. Розробка засобів їх контролю та удосконалення систем подачі матеріалу і енергоносія є важливою частиною інформаційного та технічного забезпечень систем керування та підвищення ефективності роботи обладнання.

© Н. С. Прядко, О. Д. Ігнат'єв, Г. М. Шевельова, К. В. Тернова, 2021

Техн. механіка. – 2021. – № 4.

Властивості вхідного постачання відносять до класу збурень через складність керування ними. Звичайно вони змінюються в широких межах випадковим чином і негативно позначаються на показниках усього переділу. Спроби стабілізації вхідного постачання шляхом впровадження систем усереднення вхідної руди широкого застосування не знайшли, хоча коливання її крупності й механічних властивостей при стабільній продуктивності змінюють ступінь заповнення млина, що впливає на циркулююче навантаження й щільність зливу [1]. Розробка систем оперативного автоматичного контролю фізико-механічних властивостей вхідної руди є важкою і часто невизначеною задачею, тому на практиці знаходять застосування системи непрямой оцінки властивостей постачання (по циркулюючому навантаженню, щільності зливу класифікатора, розрідженню тиску тощо) з корекцією продуктивності постачання або ступеня заповнення [2].

Ступінь заповнення млина багато в чому визначає його продуктивність за готовим продуктом. У системі керування інформацію про навантаження використовують для стабілізації співвідношення суцільного середовища та дискретної фази на вході млина або корекції завдання за ступенем заповнення при зміні властивостей постачання [3]. Для контролю циркулюючого навантаження вимірюють струм або потужність двигуна класифікатора. В Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (ІТМ НАНУ і ДКАУ) розроблено метод акустичного моніторингу режимів подрібнення, встановлено залежності характеристик акустичних сигналів робочих зон млина від технологічних параметрів процесу [4], що стало базою розробки методу контролю та керування продуктивністю млина та якістю продукту. На якість та чистоту продукту має значний вплив робота ежекторного вузла млина, система подачі матеріалу у зону подрібнення [5]. Підвищення ефективності тонкого подрібнення можливе за рахунок удосконалення елементів конструкції ежектора, раціональної організації двофазного потоку в каналах подрібнювача, зменшення зносу млинів, збільшення їх довговічності і зручності експлуатації [6–10]. Для виключення зносу розгінних трубок та домішок у готовий продукт в інституті розробляється газодинамічний метод захисту газопроводів ежектора та удосконалення системи подачі матеріалу у помольну камеру [11–12].

Мета роботи – аналіз шляхів керування газо-, масопотоками у струминному млині для підвищення ефективності його роботи.

Підвищення ефективності роботи ежектора струминного млина. В якості способу підвищення ефективності роботи ежектора струминного млина запропоновано використовувати модель з додатковим кільцевим підводом енергоносія та конічним насадком для розгінної трубки (рис. 1). Це дозволяє організувати течію всередині розгінної трубки таким чином, щоб отримати на виході більш рівномірний потік з швидкістю W .

Модель складається з вузла підведення пасивного потоку 1, сопла ежекторного газу 2, розгінної трубки 3 та вузла додаткового підведення енергоносія 4.

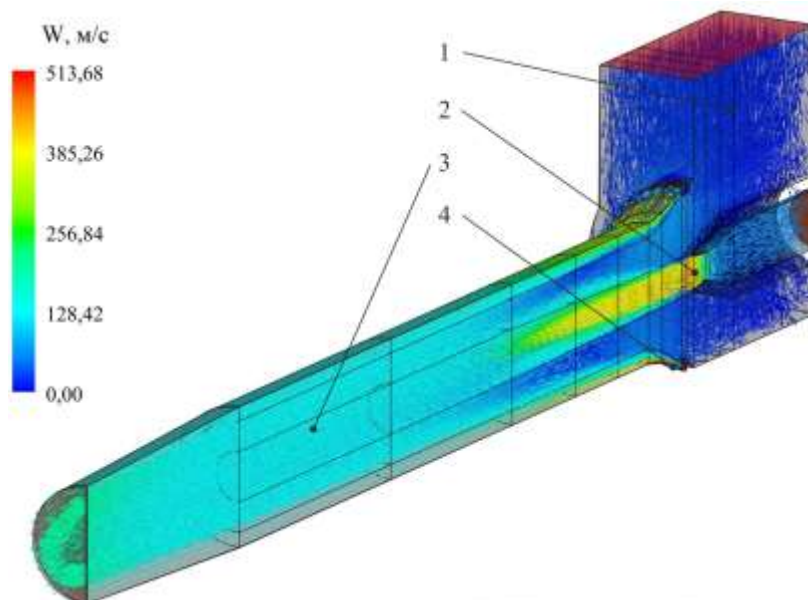


Рис. 1

Дослідження впливу геометричних параметрів ежектора струминного млина проводилося методом чисельного моделювання в програмному комплексі Ansys Fluent з використанням моделі турбулентності $k - \omega$ SST.

Для вирішення цієї задачі побудовано розрахункову сітку зі змінним розміром елементів, що враховує особливості геометрії і характер течії в даному ежекторі (рис. 2).

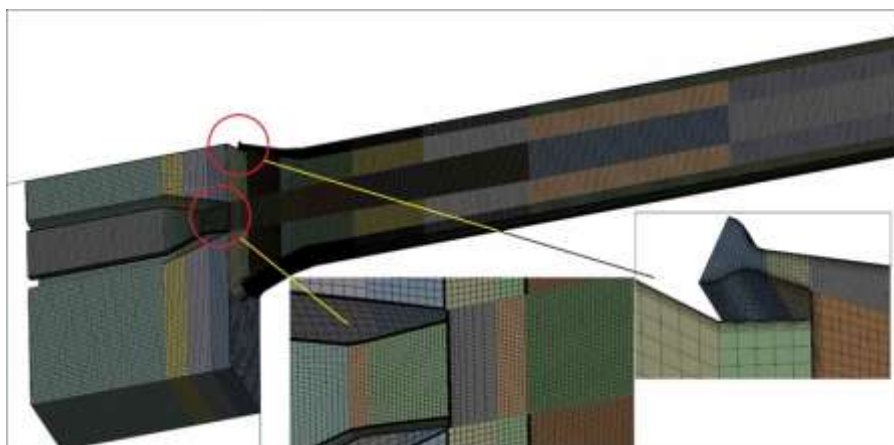


Рис. 2

Пристінковий шар моделювався призматичними шарами з фіксованою товщиною першого шару (0,005 мм). Кількість призматичних шарів – 12, при цьому безрозмірна пристінкова координата Y^+ в області центрального сопла змінювалася від 0,2 до 1,0; для кільцевого сопла вдуву від 0,05 до 0,2. Середні значення безрозмірної пристінкової координати для розгінної трубки Y^+ дорівнює 1,2.

У цій роботі вплив форми кінцевої ділянки розгінної трубки на характеристики течії розглядався для двох видів ежектора, що мають однакові гео-

метричні параметри. У першому випадку підведення активного газу здійснювалося через центральне сопло з тиском гальмування 0,4 МПа. У другому випадку підведення активного газу здійснювалося як через центральне сопло, так і через кільцеве сопло, при цьому тиск подачі також склав 0,4 МПа.

На рис. 3 представлено картину течії й лінії току в ежекторі з розгінною трубкою без конічного насадка при відсутності додаткового підведення енергоносія. Характер течії в цьому ежекторі має складну просторову структуру. Це обумовлено несиметричністю геометрії вхідної частини і бічною подачею пасивного потоку.

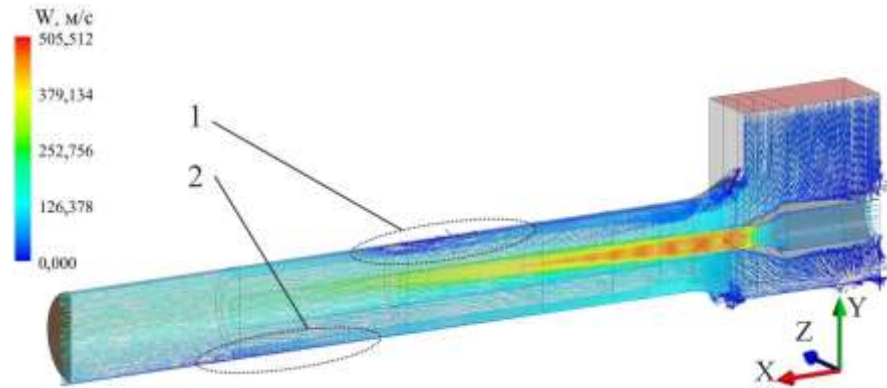


Рис. 3

При обтіканні центрального сопла пасивним потоком утворюється вихрова течія з великомасштабними вихорами 1 і 2, які поширюються по всій довжині розгінної трубки і призводять до утворення вихрових зон.

У зоні 1 спостерігається помітне гальмування потоку, а в зоні 2 утворюється вихор зі зворотною течією (рис. 3). Це призводить до значного відхилення ядра активного струменя вгору і нерівномірності поля швидкостей у вихідному перерізі розгінної трубки.

Застосування конічного насадка для даного ежектора (рис. 4) призводить до інтенсифікації вихрової течії з утворенням зворотних течій як в зоні 1, так і в зоні 2. Причому зона 1 зсувається до початку трубки, а зона 2 значно збільшується.

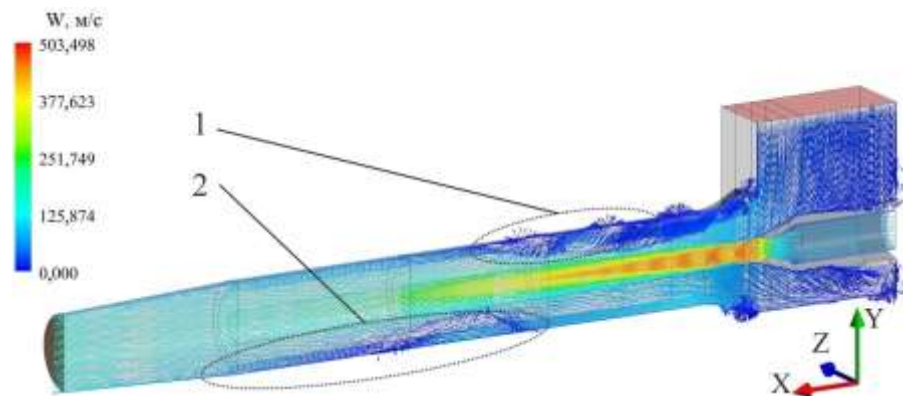


Рис. 4

Незважаючи на це, конічний насадок значно «вирівнює» розподіл середньої швидкості W_a у вихідному перерізі ежектора (рис. 5, крива 1) у порівнянні зі значною несиметричністю потоку для трубки циліндричної форми (рис. 5, крива 2).

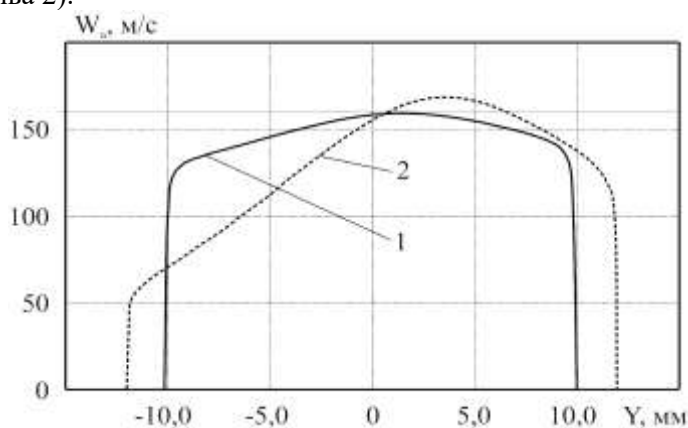


Рис. 5

Розглянемо тепер особливості течії в ежекторі з циліндричною розгінною трубкою з додатковим підводом енергоносія через кільцеве сопло (рис. 6).

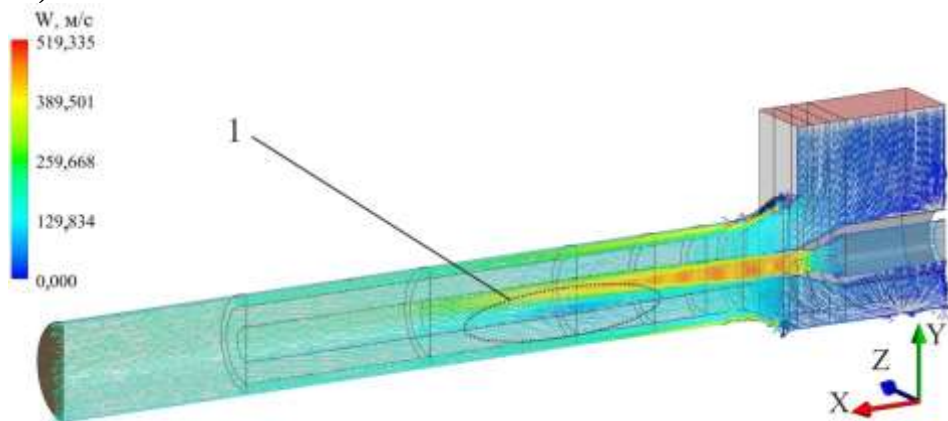


Рис. 6

В даному випадку, незважаючи на утворення великомасштабних вихорів у вхідній частині ежектора, по всій довжині розгінної трубки вихори відсутні. Спостерігається невелика зона позитивного градієнта тиску 1 (рис. 6), що призводить до відхилення струменя, який надходить з центрального сопла.

Конічний насадок (рис. 7) в даному випадку призводить до значної зміни характеру течії в розгінній трубці:

- повністю відсутні вихрові зони по всій довжині розгінної трубки, а також зони позитивного градієнта тиску;
- істотно підвищується рівномірність поля швидкостей у вихідному перерізі ежектора;
- забезпечується стабільний, рівномірний пристінковий шар від кільцевого сопла вдуву.

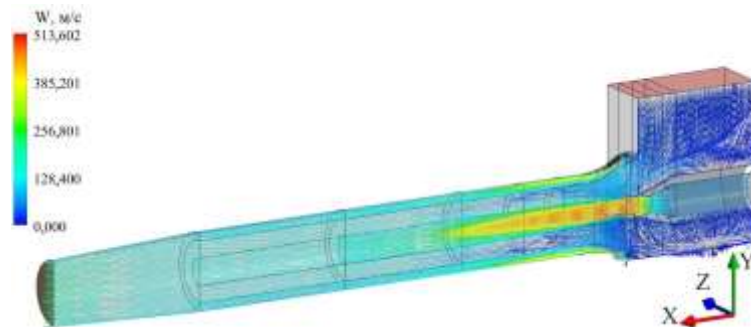


Рис. 7

Розподіл швидкості у вихідному перерізі несиметричний (рис. 8). Крива 1 відповідає випадку ежектора з циліндричною розгінною трубкою, крива 2 – з трубкою з конічним насадком.

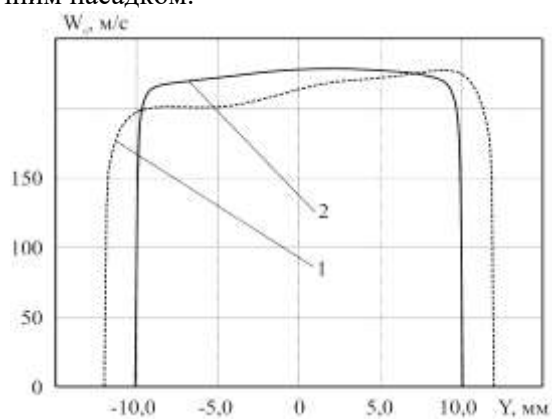


Рис. 8

Як видно з рис. 8, конічний насадок значно вирівнює потік.

Розглянемо картини течії у вихідному перетині розгінної трубки у випадку кільцевого підведення додаткового потоку енергоносія (рис. 9).

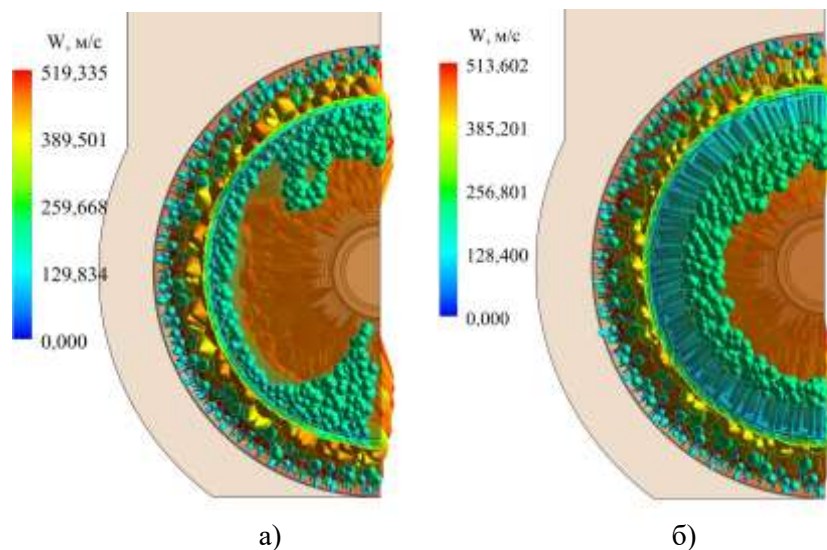


Рис. 9

Слід зазначити, що пристінковий шар від кільцевого сопла вдуву в випадку циліндричної розгінної трубки нестабільний, спостерігаються зони з нерівномірним розподілом потоку (рис. 9, а)). Натомість конічний насадок значно стабілізує потік і забезпечує стійкий пристінковий шар, утворений підведенням енергоносія через кільцеве додаткове сопло (рис. 9, б)).

Отже, використання додаткового підведення енергоносія через кільцеве сопло в ежектор струминного млина дозволяє отримати рівномірний пристінковий шар, який захищає стінки розгінної трубки від зносу. А конічний насадок для трубки забезпечує безвідривну течію без утворення вихрових зон та рівномірний розподіл швидкостей на виході з ежектора.

Підвищення якості продукту подрібнення на основі акустичного моніторингу. В ІТМ НАНУ і ДКАУ [2] з 2010 року розробляється новий підхід до аналізу процесу тонкого подрібнення, який заснований на застосуванні акустичного аналізу режимів роботи струминного подрібнювача. На основі цього методу була проведена низка експериментальних досліджень на різноманітних матеріалах, в ході яких виявили залежності величини амплітуди від розміру частинок, що транспортуються, та підтвердили виявлену раніше лінійну залежність цих параметрів, на що вказують високі коефіцієнти кореляції ($R = 0,98$).

Проаналізувавши спектри частот різних матеріалів (кварц, шлак, шамот) різної крупності при транспортуванні в потоці енергоносія (стиснене повітря), отримали характерні частоти для кожної з розглянутих фракцій, наприклад для фракції 0,2 мм частота становить 69 кГц, для 0,315 мм – 60 кГц, а для 0,4 мм – 78 кГц. При цьому з розглянутого спектра частот сигналів були виключені частоти від 0 до 40 кГц і від 90 кГц і вище, в зв'язку з тим, що дані частоти не несуть інформації про розмір частинок, тому що вони характерні для процесу в цілому. В ході досліджень зв'язків крупності матеріалу з акустичними параметрами сигналів отримані амплітуди, відповідні характерним частотам для певного розміру частинок.

Аналіз записаних акустичних сигналів при транспортуванні фракцій матеріалів різної крупності і густини (шлак, кварц, шамот) показав, що характерні частоти не залежать від властивостей матеріалу і є однаковими для фракцій однієї і тієї ж крупності, для різних розглянутих матеріалів (рис. 10).

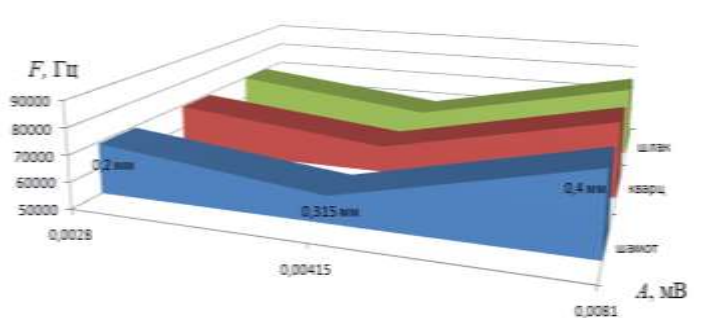


Рис. 10

В ході досліджень зв'язку крупності матеріалу з акустичними параметрами сигналів отримані амплітуди, відповідні характерним частотам для певного розміру частинок. Встановлено, що для матеріалів різних властивостей, але однакової крупності, акустичні сигнали при транспортуванні мають однакову характерну частоту, причому амплітуди A_x цих сигналів лінійно залежать від крупності матеріалу.

Оскільки при промисловому подрібненні завжди задається необхідний клас крупності готового продукту [13] і допускається лише 1,5 % частинок крупніше цього класу, то знаючи характеристики акустичних сигналів для окремих фракцій матеріалів, можливо контролювати крупність одержаного продукту. Поява сигналів на характерній частоті, амплітуда яких відрізняється від встановленої амплітуди сигналів, характерних для контрольованого класу крупності, є ознакою наявності в продукті частинок більшої фракції.

Однак для контролю якості продуктів подрібнення недостатньо знати лише наявність певних фракцій, а й необхідно встановити кількісний вміст певної фракції. Для цього була розроблена методика аналізу дисперсії характерних частот сигналів при моніторингу транспортування різноманітних матеріалів. В ході проведення досліджень було встановлено, що характерна частота сигналів акустичного моніторингу для певної фракції при зміні кількості фракції в суміші має різну величину дисперсії. На рис. 11 показано залежності дисперсії характерної частоти F акустичних сигналів двох фракцій шамоту від складу суміші (з різними виходами β , % класів у суміші).

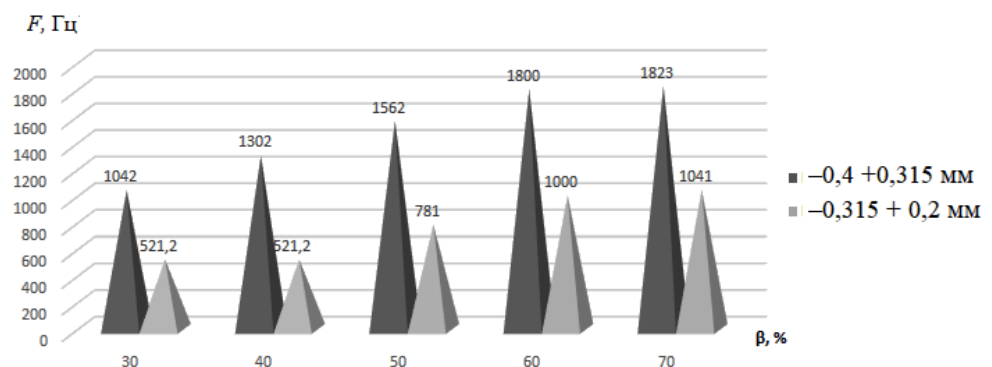


Рис. 11

Для більш загального випадку величину дисперсії нормалізували величиною характерної частоти та одержали загальні залежності нормованої дисперсності $\bar{f}(\beta)$ від виходу β (або маси) різних фракцій в матеріалі. Аналіз результатів дозволив встановити існуючу залежність дисперсії характерної частоти акустичних сигналів від маси відповідної фракції суміші при транспортуванні матеріалу в потоці (рис. 12): 1 –0,315 + 0,2 мм; 2 –0,4 + 0,315 мм.

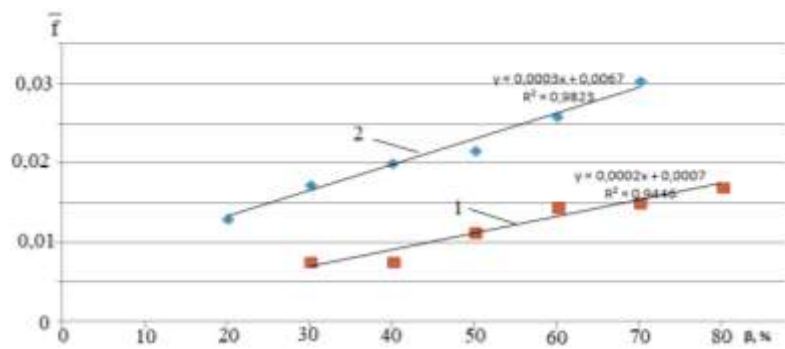


Рис. 12

Це дозволяє зробити обґрунтований висновок про те, що характер залежності описується лінійною функцією виду $\bar{f} = a\beta + b$, про що свідчать високі значення коефіцієнта надійності апроксимації. Коефіцієнти a , b залежать від розміру частинок фракції і властивостей матеріалу, причому коефіцієнт a прямо пропорційно залежить від величини частинок фракції. Слід зазначити, що коефіцієнт a має одне і те ж значення для фракцій однакової крупності різних матеріалів, тобто є ознакою крупності частинок фракції.

Розроблена методика дозволяє прискорити процес визначення крупності матеріалу та підвищити якість готового продукту подрібнення.

Розробка методу автоматичного керування процесом подрібнення.

Для контролю продуктивності млина як головного елемента підвищення ефективності процесу було розроблено метод автоматичного керування на основі аналізу акустичних сигналів робочих зон, зокрема зони подрібнення.

Для визначення технологічних параметрів, що впливають на продуктивність млина, було використано регресійний аналіз. Побудована регресійна модель процесу струминного подрібнення показала переважний вплив рівня завантаження помольної камери на продуктивність млина в цілому і параметри акустичних сигналів. Отримані регресійні залежності впливу кожного прийнятого фактора на продуктивність струминного млина адекватно описують процес подрібнення і були використані для підвищення ефективності струминного подрібнення. Наприклад, на рис. 13 показана тривимірна залежність потужності сигналів (P) акустичного моніторингу струминного подрібнення шамоту від рівня завантаження (Z) і продуктивності (Q) млина.

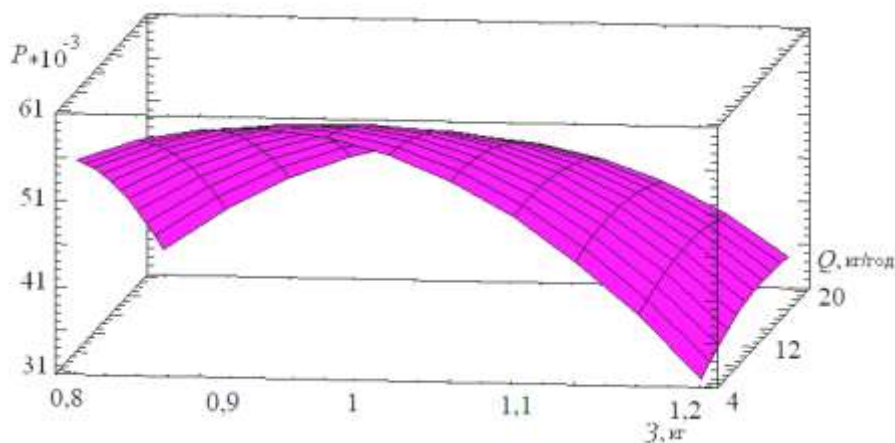


Рис. 13

Встановлено, що продуктивність млина найбільше залежить від завантаження камери в робочому режимі подрібнення, а характеристики акустичних сигналів пов'язані з рівнем завантаження. Встановлені залежності характеристик акустичних сигналів від технологічних параметрів постали основою розробки системи автоматичного керування продуктивністю газоструминного млина. Ця система заснована на керуванні завантаженням помольної камери, причому враховується циркуляційне навантаження млина при роботі у замкнутому циклі. Створено діючу модель керованого бункеру завантаження. В якості силового приводу був обраний соленоїд з живлячою напругою 12 В і робочим струмом в сталому режимі 5 А, з пружиною повернення, яка опускає

оживайло (заслінку) і закриває бункер завантаження в разі припинення подачі напруги живлення. Після обробки всіх даних керуючий сигнал надходить з модуля розширення на блок керування соленоїдом, який зібраний на базі польового транзистора STP100N6F7 (рис. 14, а)) з робочою напругою 60 В і максимальним струмом до 100 А. Потім керуючий сигнал передається на відкриття або закриття заслінки бункера завантаження (рис. 14, б)).

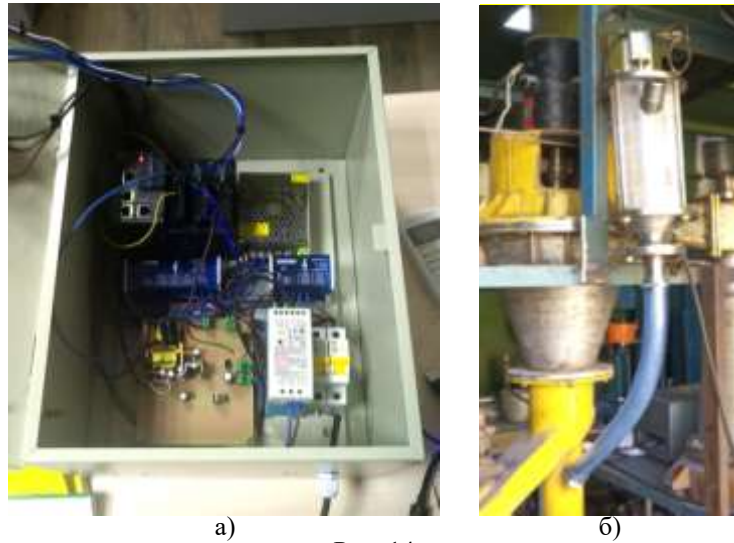
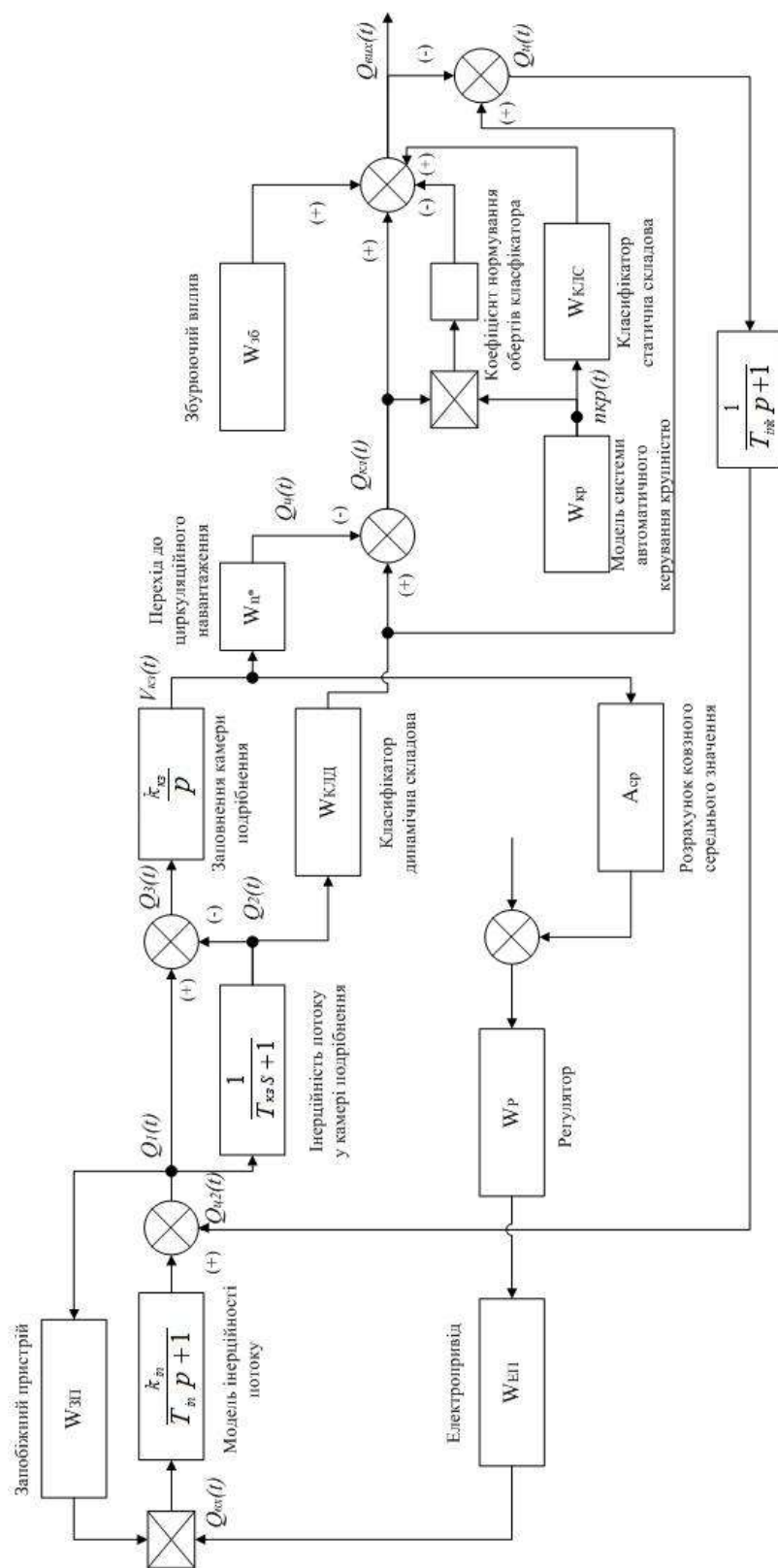


Рис. 14

Для перевірки працездатності системи керування розроблено імітаційну модель керування процесом подрібнення (рис. 15), яка складається з моделі об'єкту керування та моделі системи керування. Об'єкт керування (струминний млин) описаний у вигляді двох основних блоків, а саме камери здрібнення та класифікатора. Вхідним параметром для струминного млина є $Q_{ex}(t)$, дія даного параметру обмежується запобіжним пристроєм $W_{зп}$ заповнення камери здрібнення. Інерційність процесу транспортування сипучого матеріалу до камери здрібнення представлена моделлю імітації інерційності потоку між заслінкою (оживайло) та камерою здрібнення у вигляді аперіодичної ланки 1-го порядку, де k_{in}, T_{in} – коефіцієнти інерційності.

Модель камери здрібнення складається з трьох основних ланок: ланки інерційності потоку у камері здрібнення, ланки заповнення камери здрібнення об'ємом $V_{кз}$ у вигляді інтегральної ланки [14 – 15] та моделі переходу до циркуляційного навантаження $W_{ц}$ в залежності від ступеня заповнення камери здрібнення. Вхідним параметром для блоку камери здрібнення є надходження матеріалу Q_3 , що складається з трьох складових: початкового матеріалу Q_1 , матеріалу, що поступає з класифікатора на доподрібнення Q_2 , та матеріалу циркуляційного навантаження $Q_{ц}$, і вимірюється у кг/год. Вихідними параметрами є вихід продукту $Q_{вих}$ у кг/год та відсоток заповнення камери здрібнення. Для визначення виходу продукту у моделі використовується аперіодична ланка 1-го порядку. Для імітації випадкових збурень $W_{зб}$ у камері здрібнення використовується додавання до основної величини випадкової складової. Заповнення камери здрібнення визначається у процентах від її об'єму (максимальний допустимий об'єм заповнення V_3 складає 80 %). Сам процес заповнення моделюється за допомогою інтегральної ланки з насиченням, що імітує кінцевий об'єм камери здрібнення.



Після камери здрібнення подрібнений матеріал надходить у класифікатор. Вхідним параметром для класифікатора є надходження подрібненого матеріалу $Q_{кл}$, вихідним є готовий продукт $Q_{вих}$ та матеріал, який надходить на доподрібнення, представлений у вигляді позитивного обраного зв'язку, що надходить на вхід камери подрібнення. Модель класифікатора складається з наступних основних частин: динамічної моделі класифікатора, статичної моделі класифікатора $W_{кис}$, моделі системи керування крупністю та моделі імітації інерційності потоку між класифікатором та камерою здрібнення.

Динамічна модель класифікатора $W_{клд}$ описує динамічну складову проходження матеріалу класифікатора рівнянням третього порядку в результаті параметричної ідентифікації експериментальних даних.

Процес пульсації масопотоку у класифікаторі моделюється за допомогою додавання випадкової складової. Друга частина моделі являє собою замкнений контур керування крупністю матеріалу $W_{кр}$ на виході класифікатора. Завдання на крупність задається у відносних одиницях. Передатна функція двигуна приводу та редуктору представлена аперіодичною ланкою першого порядку з коефіцієнтом $T_{кл}$. Вихідним параметром є швидкість обертання редуктора приводу $n_{кр}$. Статична модель класифікатора описує залежність крупності матеріалу від швидкості обертання редуктора. У даній замкненій системі використовується ПІ-регулятор (пропорційно-інтегрований регулятор).

За допомогою інтегральної складової знімається статична похибка регулювання. Використання ПІД регулятора (пропорційно-інтегровано-диференційного регулятора) у даній системі не доцільно тому, що система – інерційна, а випадкові збурення приведуть до збільшення похибки регулювання. Процес пульсації масопотоку у класифікаторі моделюється за допомогою додавання випадкової складової $W_{зб}$, отриманої генератором випадкових чисел за нормальним законом розподілення. Кількість готового продукту отримується шляхом віднімання від вхідної величини потоку, що йде на доподрібнення.

Керування завантаженням відбувається на основі аналізу середньої амплітуди $A_{ср}$ акустичних сигналів в зоні подрібнення. Система керування завантаження струминного млина представлена у вигляді релейного регулятора та обчислення ковзного середнього значення у зворотному зв'язку. Проведені експериментальні дослідження на імітаційній моделі показали:

1. Інерційність об'єкту керування дозволяє використовувати релейний регулятор для розробки системи керування процесом подрібнення.
2. Система автоматичного керування процесом подрібнення з використанням релейного регулятора зі зворотнім зв'язком за ступенем заповнення камери здрібнення, зменшує амплітуду коливання вихідного потоку, у порівнянні з керуванням процесом подрібнення оператором, що дозволяє підвищити продуктивність (до 10 %) зі зменшенням ризику переходу до аварійного стану «завалу». Цей факт підтверджено промисловими випробуваннями в умовах Вільногірського гірничо-металургійного комбінату.

Висновки. Для інтенсифікації процесу подрібнення в струминному млині запропоновано схему ежекторного вузла з розгінною трубкою, яка має конічний насадок, та кільцевим соплом для підведення додаткового потоку газу. Проведено порівняльний аналіз запропонованої схеми з ежектором без кільцевого підведення енергоносія та циліндричною розгінною трубкою.

Результати чисельного моделювання течії в ежекторі показали, що додаткове підведення енергоносія в комбінації з використанням конічного насадка для розгінної трубки дозволяє отримати рівномірно прискорений потік на виході з ежектора та стабільний пристінковий шар для захисту стінок конструкції від зносу.

Розроблена методика контролю дисперсності матеріалу в потоці на основі аналізу характеристик акустичних сигналів дозволяє підвищити якість готового продукту подрібнення за рахунок своєчасного виявлення недопустимої крупності і виключення повторного подрібнення.

Система автоматичного керування завантаженням млина за характеристиками акустичних сигналів зони подрібнення дає змогу підвищити продуктивність млина до 10 %.

1. Zhao X., Zhu H., Zhang G., Tang W. Effect of superfine grinding on the physicochemical properties and antioxidant activity of red grape pomace powders. *Powder Technol.* 2015. No 286. Pp.838–844. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.09.025>
2. Pryadko N. S., Ternova K. V. Acoustic monitoring of jet grinding. *Akadem periodyka.* 2020. 192 p. <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.409.192>
3. Ali M., Lin L. Optimisation and analysis of bead milling process for preparation of highly viscous, binder-free dispersions of carbon black pigment. *Prog. Org. Coat.* 2018. No 119. Pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.02.007>
4. Pryadko N., Muzyka L., Strelnikov H., Ternova K., Verhorobina I. Acoustic method of jet grinding study and control. *E3S Web of Conferences* 109, 00074 (2019) *Essays of Mining Science and Practice.* 2019. Pp.1–11. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900074>
5. Шевелёва А. М. Методы повышения качества готового продукта при струйном измельчении. Збагачення корисних копалин. 2018. Вип. 69 (110). С. 86–94.
6. Kong F., Kim H. Analytical and Computational Studies on the Performance of a Two-Stage Ejector Diffuser System. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2015. Vol. 85. Pp. 71–87. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.117>
7. Бараковских Д. С., Шишкин С. Ф., Шишкин А. С. Движение частиц в разгонной трубке струйной мельницы. *Вестник Белгородского государственного технического университета им. В.Г. Шухова.* 2017. № 5. С. 82–88.
8. Rao S. M. V., Jagadeesh G. Novel supersonic nozzles for mixing enhancement in supersonic ejectors. *Applied Thermal Engineering.* 2014. No 71. Pp. 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.06.025>
9. Ameer K., Aidoun Z., Ouzzane M. Modeling and numerical approach for the design and operation of two-phase ejectors. *Applied Thermal Engineering.* 2016. No 109. Pp. 809–818. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.022>
10. Бараковских, Д. С., Шишкин, С. Ф. Эжекторная струйная мельница с внешним давлением. Промышленное производство и металлургия: материалы международной научно-технической конференции. 2020. С. 14–19.
11. Ігнат'єв О. Д., Шевельова Г. М. Вплив місця розташування елемента керування газовими потоками в ежекторному вузлі на характер течії потоку. *Технічна механіка.* 2020. № 3. С. 54–63. <https://doi.org/10.15407/itm2020.03.054>
12. Шевелёва А. М., Ігнат'єв А. Д. Расчет поля скоростей эжектора с дополнительным подводом энергосносителя по оси разгонной трубки. Збагачення корисних копалин: *Наук.-техн. зб.* 2019. Вип. 73(114). С. 92–98.
13. Zhiyong Gaoa, Ruiying Fana, John Ralstonc, Wei Suna, Yuehua Hu Zhiyong Gaoa, Ruiying Fana, John Ralstonc, Wei Suna, Yuehua Hu. Surface broken bonds: An efficient way to assess the surface behaviour of fluorite. *Minerals Engineering.* 2019. No 130. Pp. 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.09.024>
14. Ткачев В. В., Бубликов А. В. Использование имитационного моделирования для исследования системы автоматического управления добычным комбайном. *Национальный горный университет.* 2015. 182 с.
15. Решмин Б. И. Имитационное моделирование и системы управления. *Инфра-Инженерия.* 2016. 74 с.

Отримано 07.06.2021,
в остаточному варіанті 23.11.2021