

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 621.926.5-023(048.83)

МКУЛЬОНОК І. О., КАРВАЦЬКИЙ А. Я., ЛЕЛЕКА С. В., ІВАНЕНКО О. І.*
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПОДРІБНЮВАЛЬНІ ТІЛА БАРАБАННИХ МЛИНІВ І ДРОБАРОК (Огляд конструкцій)

Розроблено класифікацію подрібнювальних тіл барабанних подрібнювачів – млинів і дробарок – для руйнування кускових і сипких матеріалів, оброблюваних на підприємствах хімічної, гірничорудної, будівельної, харчової, металургійної та електродної галузей промисловості. Виконано критичний огляд найбільш характерних конструкцій подрібнювальних тіл барабанних подрібнювачів, запропонованих науковцями, конструкторами й винахідниками провідних країн світу. Конструкції подрібнювальних тіл проаналізовано залежно від методу подрібнювання, їхньої форми, ступеня складання, ступеня рухливості елементів тіл, наявності додаткових функцій, а також матеріалу тіл та їхніх конструктивних елементів.

Ключові слова: обладнання хімічної технології, збагачувальне устаткування, барабанний млин, подрібнювальне тіло, класифікація, конструкція.

DOI: 10.20535/2617-9741.2.2022.260339

* Corresponding author: olenka.vasaynovich@gmail.com
Received 25 April 2022; Accepted 22 June 2022

Постановка проблеми. Одним з найбільш ефективних і продуктивних видів обладнання підприємств хімічної, гірничорудної, металургійної, будівельної, харчової та електродної галузей промисловості, призначеного для руйнування кускових, у тому числі й сипких матеріалів, є барабанні подрібнювачі – дробарки і млини [1–4]. Серед барабанних подрібнювачів зазвичай виділяють барабанні млини, у той час, як барабанні дробарки розглядають набагато рідше. При цьому барабанні дробарки конструктивно принципово не відрізняються від барабанних млинів, проте вони призначені для одержання продукту еквівалентним діаметром не більш ніж 5 мм [4].

Перевагами барабанних млинів є відносна простота конструкції, висока продуктивність, рівномірність розмірів одержуваного продукту, а також широка номенклатура подрібнюваної сировини. До їхніх недоліків належать значні габарити, а також матеріало- та енергоємність.

Однією з галузей промисловості, в якій разом з валковими подрібнювачами [5, 6] широко використовуються барабанні млини, є електродна промисловість, продукція якої призначена для широкого застосування в хімічній промисловості та металургії [7–9]. Зокрема в електродній промисловості барабанні млини використовують для тонкого подрібнення вуглевісної сировини для електродної маси, пресової продукції та інших матеріалів і виробів.

Основними робочими органами барабанних млинів є подрібнювальні тіла, тому обґрунтований вибір подрібнювальних тіл, найбільш доцільних для ефективного руйнування певної сировини для одержання продукту з прогнозованим розміром частинок є актуальним завданням.

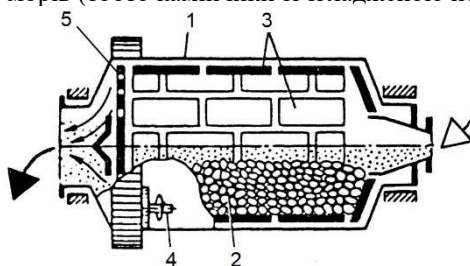
Зазначене питання вже було порушене авторами [10], проте далі наведено більш ґрунтовний аналіз розроблених конструкцій подрібнювальних тіл барабанних млинів і дробарок.

Метою статті є розроблення розгорнутої класифікації подрібнювальних тіл барабанних подрібнювачів – дробарок і млинів, а також аналіз найбільш характерних їхніх конструкцій.

Аналіз попередніх досліджень

Відповідно до ДСТУ 2415–94 барабанний млин – це пристрій для подрібнення мінеральної сировини, у якому подрібнення матеріалу відбувається під дією подрібнювальних тіл під час його руху вздовж барабана. При цьому залежно від типу подрібнювальних тіл відповідний барабанний млин називають кульовим,

стрижневим і самоподрібнювальним [11] (рис. 1). Іноді в окремий тип також виділяють рудногалькові барабанні млини, подрібнювальними тілами яких є галька – уламки гірської породи розміром від 10 до 100 мм, обкатані водою річок або морів (тобто камінчики зі згладженою поверхнею) [4].



1 – барабан; 2 – розмельні кулі; 3 – футерувальні плити; 4 – привід; 5 – решітка
Рис. 1 – Схема барабанного кульового млина з розвантаженням крізь решітку

Кульові млини виконують з центральним розвантаженням (крізь порожнисту цапфу – млини МШЦ), з розвантаженням крізь решітку (МШР) і з периферійним розвантаженням крізь сито, а стрижневі – лише з центральним розвантаженням (МСЦ) [3].

Під час обертання барабана подрібнювальні кулі підіймаються під дією сили тертя по його стінках доти, доки кут підйому не перевищить кута природного укосу, після чого вони вільно падають, подрібнюючи матеріал ударами та стиранням. Стрижні в барабані не падають, а перекочуються, що майже виключає переподрібнення матеріалу.

Розмельні кулі найчастіше виготовляють з металу (рідше кварцу або кераміки) діаметром від 30 до 120 мм з кроком 10 мм (зазвичай діаметр куль складає $1/24$ – $1/18$ діаметра барабана), а стрижні – діаметром 40–100 мм. Розміри барабанів (діаметр і довжина: $D \times L$) досягають у кульових млинах 6000×8000 мм, а в стрижневих – 4500×6000 мм; потужність привода таких млинів становить 2500 кВт. Частота обертання барабана – від 12,5 до 30,0 хв⁻¹. Ступінь подрібнення 50–100, при цьому подрібнення виконують як сухим, так і мокрим способами. Ступінь заповнення барабана кулями – 30–40 %. При цьому розрізняють короткі ($L \leq D$) і довгі ($L > D$) млини.

Проте крім найбільш поширених куль і стрижнів як подрібнювальні тіла барабанних подрібнювачів запропоновано не тільки вдосконалені, а й принципово нові конструкції.

Аналіз конструкцій подрібнювальних тіл барабанних подрібнювачів дає підставу запропонувати їхню класифікацію, схему якої наведено на рис. 2.

За методом подрібнення розрізняють подрібнювальні тіла ударної, стиральної, роздавлювальної, розколювальної та комбінованої дії.

Найбільш поширені кульові подрібнювальні тіла, що використовуються в обертових барабанних млинах, зазвичай належать до тіл ударної дії (рідше – комбінованої ударно-стиральної дії), а циліндричні стрижні – стиральної та/або роздавлювальної дії [2–4].

Подрібнювальне тіло розколювальної дії виконано у вигляді кулі з рівномірно розташованими на його поверхні шістьма конічними виступами зі сферичними вершинами (пат. № UA3362U). Недолік цієї конструкції – подрібнення сировини переважно розколюванням, а не стиранням, внаслідок чого таке тіло може бути ефективним лише в дробарках і не може бути рекомендоване для використання у млинах.

До тіл комбінованої дії можна віднести завантаження млинів, що складається з гладких куль і куль з діаметрально виконаною кільцевою канавкою (пат. № RU2297280C1; рис. 3).

За формою розрізняють подрібнювальні тіла неправильної форми та правильної форми (тіла обертання, у тому числі й поверхні 2-го порядку, багатогранники).

Дрібні кулі з діаметрально каналом овального поперечного перерізу та сферичними западинами на його кінцях (пат. № СН177325А, FR781678А), закріпленим розрізним вигнутим пружинним кільцем (пат. № DE2002950А1), рівномірно розподіленими по поверхні кульовими виступами (пат. № CN202447152U), виступами у вигляді зрізаних конусів (пат. № CN103223368А, CN203124048U), трьома паралельними кільцевими виступами (пат. № CN103316743А, CN203316210U), паралельними кільцевими канавками (пат. № RU2203138С1), V-подібними меридіональними канавками (пат. № CN102688794А, CN202666933U), двома діаметрально розташованими западинами (пат. № US1331964А, GB101055А), трьома розташованими в одній площині під кутом 120° один до одного сферичними западинами (пат. № CN203076031U), шістьма

сферичними западинами (пат. № FR2062716A5, US1331964A, RU189341U1, CN201505548U), довільною кількістю сферичних западин, які не змінюють положення центра тяжіння кулі (заявки № WO02/42001A1, US2004/251354, FR2817173A1), круглими плоскими площадками кількістю від трьох до дев'яти (пат. № DE866894C, № FR31750E, FR33545E, FR39587E, № CN106140410A) і більше (пат. № DE867045C), а також навитим по спіралі валиком (а. с. № SU1360792A1; рис. 4). Усі зазначені вдосконалення куль сприяють подрібненню не тільки за рахунок ударів, але й стирання.

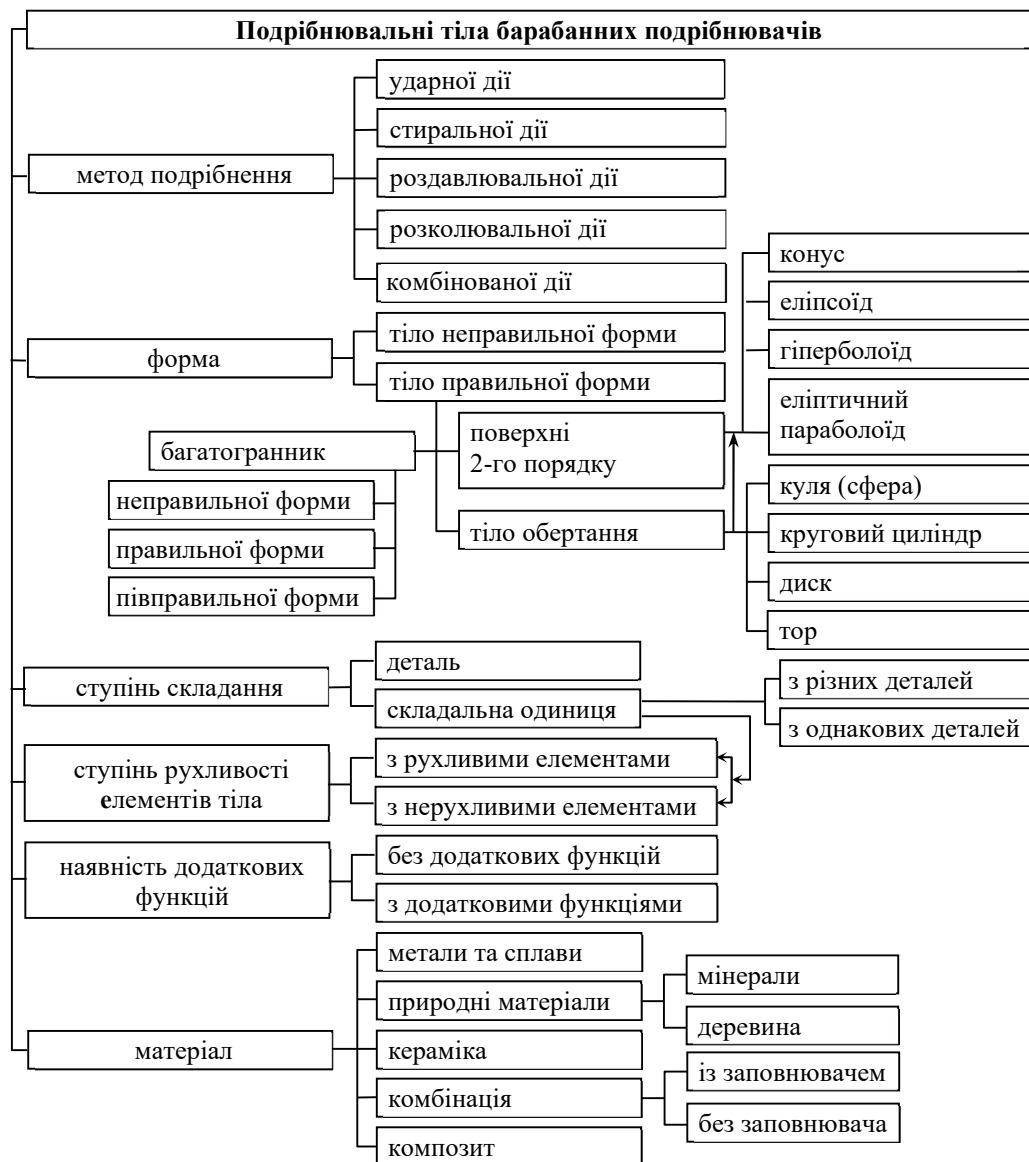


Рис. 2 – Класифікація подрібнювальних тіл барабаних подрібнювачів

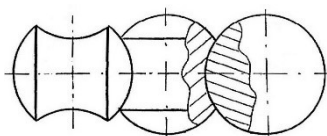


Рис. 3 – Подрібнювальне тіло згідно з пат. № RU2297280C1

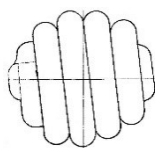


Рис. 4 – Подрібнювальне тіло згідно з а. с. № SU1360792A1

Подрібнювальний елемент з великою робочою поверхнею у вигляді центрального тіла з шістьма півкулями, що виступають, розташованими в трьох взаємно перпендикулярних площинах (пат. № CH135807A, FR663729A; рис. 5).



Рис. 5 – Подрібнювальне тіло згідно з пат. № CH135807A, FR663729A

Подрібнювальні тіла у вигляді півкулі (пат. № CN1129147A), сплюснутої кулі, отриманої обертанням еліпса навколо його малої осі (а. с. № SU1187877A1), додекаедра та ікосаедра (пат. № CN103071569A, CN203002435U, CN2207879Y; рис. 6), тетраедра з опуклими гранями (пат. № CN205966058U), тетраедра з увігнутими гранями та зрізаними вершинами (пат. № CN1644240A, CN2757922Y; рис. 7).

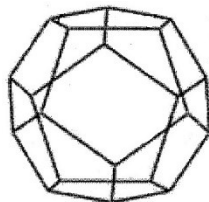


Рис. 6 – Подрібнювальне тіло у вигляді додекаедра (пат. № CN103071569A, CN203002435U)

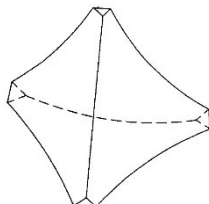


Рис. 7 – Подрібнювальне тіло у вигляді zdeформованого тетраедра (пат. № CN1644240A, CN2757922Y)

Порожнисте подрібнювальне тіло яйцеподібної форми (форми падаючої краплі) (пат. № CN201214062Y), у тому числі з безліччю кільцевих канавок на його поверхні (пат. № CN202113909U), а також суцільне тіло яйцеподібної форми із западинами на його кінцях (пат. № CN202666935U, рис. 8).

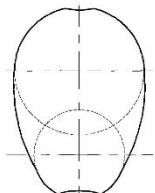


Рис. 8 – Подрібнювальне тіло згідно з пат. № CN202666935U

Наявність у стрижневих подрібнювальних тіл у вигляді довгого гладкого кругового циліндра

півсферичних кінців (а. с. № SU107979A1, пат. № CN201493145U, CN203508123U), кінців у вигляді кульових сегментів (пат. № FR1302644A, RU146333U1) або кінців з конічними фасками (пат. № US1864542A, CN202803333U) знижує ймовірність відколювання від них фрагментів.

Стрижні зі збільшеною робочою поверхнею мають поздовжні циліндричні (пат. № FR687440A, FR737929A, а. с. № SU997804A1) і трикутні (пат. № RU175201U1) пази, гвинтовий циліндричний паз (пат. № US2143732A, FR803650A, DE663183C) або тризахідну гвинтову проточку (пат. № FR482071A), поздовжні трикутні пази й безперервні трапецієподібні виступи, а також виступи у вигляді правильних чотирикутних пірамід, утворених протилежно спрямованими гвинтовими трикутними пазами (пат. № CN2180329Y), численні півсферичні виступи (пат. № CN205988785U), а також циліндричну кільцеву канавку з численними заглибленнями (пат. № CN204051806U).

Виконання кінця стрижня конічним з боку надходження в подрібнювач оброблюваної сировини підвищує ефективність подрібнення великих частинок вихідної сировини (а. с. № SU1001999A1), а наявність у стрижні наскрізного осьового отвору – знижує його масу, проте не виключає забивання отвору подрібнюваним матеріалом (пат. № CN2016928).

Подрібнювальний стрижень з поперечним перерізом у вигляді трьох або чотирьох пелюсток (однакової або різної висоти), у тому числі скрученого по довжині (пат. № GB132985A), а також подрібнювальне тіло з поперечним перерізом у вигляді трикутника Рело (заявка № WO2012/068648A2; рис. 9).

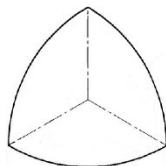


Рис. 9 – Подрібнювальне тіло згідно із заявкою № WO2012/068648A2

Завантаження подрібнювальних тіл у вигляді циліндрів, а також стрижнів з поперечним перерізом у вигляді три- і чотирьопелюсткових розеток значно збільшує поверхню контакту тіл, що взаємодіють одне з одним (а. с. № SU1308385A1; рис. 10).

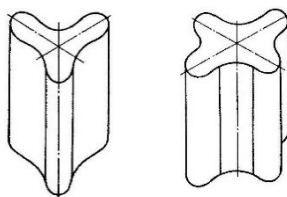


Рис. 10 – Подрібнювальні тіла завантаження млина згідно з а. с. № SU1308385A1

Подрібнювальне тіло у вигляді коротких циліндрів (цильбепсів) переважно заввишки 0,8–1,2 їхнього діаметра: виготовлені з артилерійських снарядів, що підлягають утилізації (пат. № UA29003A; рис. 11), зі сферичними кінцями і радіусною кільцевою западиною в середній частині (пат. № SU1168286A1), з осьовим отвором, розділеним однією, трьома або чотирма поздовжніми перегородками (пат. № CH129281A), з нижньою сферичною частиною (пат. № UA54882A), а також з кільцевими або спіральними виступами й западинами трикутної, прямокутної або круглої форми, що чергуються між собою (пат. № FR595675A).

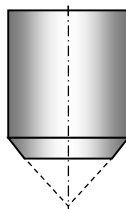


Рис. 11 – Подрібнювальне тіло, виготовлене з артилерійського снаряда, що підлягав утилізації (пат. № UA29003A)

Проте не зовсім зрозуміло переваги подрібнювальних тіл, виготовлених з артилерійських снарядів, що підлягають утилізації (див. пат. № UA29003A), адже зазначені снаряди зазвичай порожнисті, що передбачає або необхідність заварювання порожнини з торців тіла, або за наявності відкритої порожнини її забивання подрібнюваним матеріалом, що призводитиме до зміни маси тіла та втрати одержуваного продукту.

Подрібнювальні тіла у вигляді тетраедра (пат. № FR831500A, FR838649A, CH166866A, CN103240151A, CN203304028U; рис. 12) і найрізноманітніших багатогранників (правильних і неправильних, з гранями у вигляді двох і більше видів правильних багатокутників), переважно сфероїдів (пат. № GB261664A, CN104084270A).

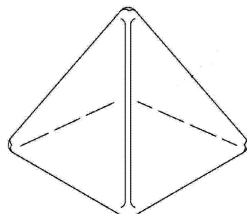


Рис. 12 – Подрібнювальне тіло у вигляді тетраедра (пат. № CN103240151A та CN203304028U)

Тіла призматичної форми з гострими або закругленими крайками й вершинами можуть бути закриті з одного кінця (тобто мати форму стакана), а в поперечному перерізі мати форму багатокутника правильної або неправильної форми (пат. № FR831500A, GB284580A), у тому числі із заокругленими вершинами (пат. № CN204093513U) або ребрами (пат. № FR750404A).

Подрібнювальне тіло у вигляді паралелепіпеда з двома протилежними торцями у вигляді взаємно перпендикулярних півциліндрів (пат. № FR50039E; рис. 13).

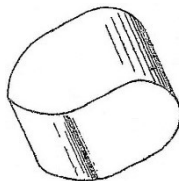


Рис. 13 – Подрібнювальне тіло згідно з пат. № GB329131A

Порожнисті тіла у вигляді відрізків труб квадратного перерізу або правильних чотирикутних призм, що виготовляються намотуванням металевго стрижня на квадратній оправці або гнучкій пластині (пат. № GB329131A; рис. 14).

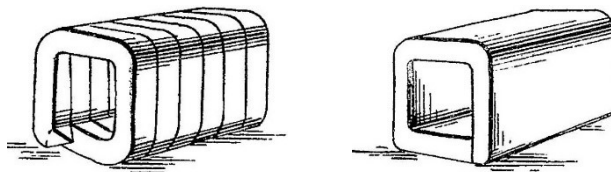


Рис. 14 – Подрібнювальне тіло згідно з пат. № GB329131A

Тіло у вигляді сталевго загартованого круглого плоского диска із закругленою периферійною частиною (пат. № GB1497977A).

Вписане в сферу подрібнювальне тіло у вигляді двох сполучених великими основами правильних зрізаних чотирикутних (пат. № FR759521A) або шестикутних (пат. № FR631143A) пірамід.

Тіло у вигляді двох правильних чотирикутних зрізаних пірамід зі сполученими великими основами (заявка № WO03/070372A1).

Подрібнювальне тіло у вигляді просторової «зірчатки», що складається з декількох чотирикутних пірамід або центральної кулі з радіально розташованими загостреними кутиками для розколювання подрібнюваної сировини в барабанних дробарках (пат. № CH166866A; рис. 15).

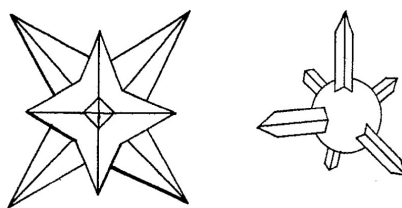


Рис. 15 – Подрібнювальне тіло згідно з пат. № СН166866А

Подрібнювальне тіло у вигляді правильної призми з основами, сполученими з великими основами правильних зрізаних пірамід (пат. № FR759521A, US1864542A, заявка № WO2013/007076A1; рис. 16), а також з основами, що переходять у зрізані конуси (пат. № CN204134701U).

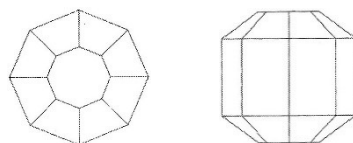


Рис. 16 – Подрібнювальне тіло згідно із заявкою заявка № WO2013/007076A1

Подрібнювальне тіло у вигляді вписаного у сферу зрізаного конуса з опуклими основами (пат. № UA59737U; рис. 17). Зазначена форма тіл підвищує їхню ударну стійкість, а також забезпечує підвищену щільність завантаження.

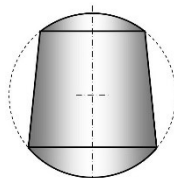


Рис. 17 – Подрібнювальне тіло згідно з пат. № UA59737U

Аналогічне подрібнювальне тіло, але вписане не в сферу, а в еліпсоїд, при цьому висота тіла збігається з малою віссю зазначеного еліпсоїда (пат. № UA28174A, UA56723U).

Подрібнювальні тіла у вигляді зрізаного конуса з меншою основою у вигляді кульового сегмента (пат. № RU49466U1, UA6902U, заявка № WO03/045564A1), з великою основою у вигляді кульового сегмента й меншою у вигляді конуса (пат. № CN201049309Y), зі сферичною та еліптичною основами (пат. № UA45644A), з більшою півсферичною основою та меншою основою у вигляді кругового сегмента (пат. № UA44957A), із западиною на більшій основі та опуклою еліпсоїдною меншою основою (пат. № UA1134U), при цьому зазначена западина може бути розташована асиметрично відносно поздовжньої осі конуса, що зміщує центр тяжіння подрібнювального тіла й підвищує ефективність руйнування сировини (пат. № RU2024312C1, UA15773C1).

Подрібнювальне тіло у вигляді двох сполучених між собою великими основами зрізаних конусів (пат. № FR584621A), у тому числі з поздовжніми та/або кільцевими канавками (пат. № FR26556E).

Тіло у вигляді еліпсоїда (пат. № DE1900587A1, CN2313666Y), у тому числі зі зрізаними вершинами з утворенням паралельних круглих основ (пат. № DE323772C) або виконаними у вершинах півсферичними западинами (пат. № CN2475466Y).

Подрібнювальні тіла складаються з двох сполучених основами частин, одну з яких виконано у вигляді півеліпсоїда, при цьому другу частину, сполучену з основою півеліпсоїда, виконано зі сферичною поверхнею, центр якої розташований у вершині півеліпсоїда (пат. RU112845U1, UA17861A).

Подрібнювальне тіло у вигляді півеліпсоїда з виконаною в центрі плоскої основи півсферичною западиною (пат. № CN2476344Y).

Подрібнювальне тіло у вигляді двох частин, сполучених між собою великими основами у вигляді півкулі та правильної п'ятикутної зрізаної піраміди з увігнутими гранями (а. с. № SU1512658A1; рис. 18). Така форма тіла знижує його зношування, а також підвищує ефективність подрібнення.

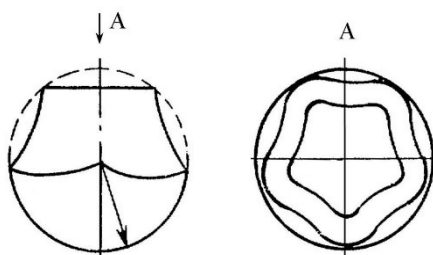


Рис. 18 – Подрібнювальне тіло згідно з а. с. № SU1512658A1

Подрібнювальне тіло у вигляді витягнутого обтічного тіла з круглою плоскою основою, сферичною вершиною й бічною поверхнею з поздовжніми виступами й западинами, що чергуються між собою (пат. № UA11814U).

Подрібнювальне тіло у формі куба запропоновано використовувати в одному завантаженні з подрібнювальними тілами у формі куль (пат. № RU2181627C2). Кубічні тіла забезпечують «водоспадний» режим за зниженої частоти обертання барабана.

Аналогічне завантаження, але з кубами, що мають сферичні западини на їхніх гранях (а. с. № SU948438A1), збільшує щільність упаковки подрібнювальних тіл у завантаженні, але при цьому підвищує ймовірність сколювання загострених ребер і вершин кубів.

Подрібнювальне тіло у вигляді опуклого тіла постійної ширини, поверхню якого утворено перетином чотирьох куль однакового радіуса з центрами у вершинах тетраедра й рівної довжині його ребер, при цьому ребра й вершини тіла виконано заокругленими (а. с. № SU1388088A1). Тіло технологічне у виготовленні й забезпечує ефективне подрібнення ударом, стиранням та розколюванням.

Аналогічні подрібнювальні тіла, що відрізняються конструктивним виконанням вершин, ребер і граней (заявка № WO2010/094091A1), а також мають кільцевий виступ (пат. № CN207102772U, заявка № WO2012/068647A2).

Аналогічне, але більш ефективне подрібнювальне тіло зі зміщеним центром мас і менш плавними ребрами й вершинами (пат. № RU2305597C1).

Подрібнювальне тіло у вигляді сфероїдального конуса з основою у вигляді тіла обертання, наприклад, кульового сегмента, при цьому в місці сполучення конуса та основи може бути виконано кільцевий виступ (пат. № CN103459039A, заявки № WO2012/048391A2, US2014/191069A1).

Подрібнювальне тіло має бічну та дві торцеві поверхні, при цьому зазначені поверхні можуть бути виконані з різною шорсткістю або рельєфом (пат. № RU2311960C1).

Тіло з опуклими та увігнутими ділянками, утвореними поверхнями обертання двох дзеркальних увігнутих ділянок логарифмічної спіралі (а. с. № SU801881A1). Зазначене тіло характеризується складністю у виготовленні та низькою зносостійкістю у процесі експлуатації.

Подрібнювальне тіло у вигляді тіла обертання з синусоїдальною твірною (а. с. № SU837406A1). Кільцеві виступи тіла підвищують ефективність подрібнення ударом, а виступи й западини – стиранням.

Витягнуте подрібнювальне тіло з бічною поверхнею у вигляді однополюго гіперболоїда й торцевими поверхнями у вигляді двополюго гіперболоїда істотно підвищує стиральний ефект тіла (а. с. № SU1127629A1).

Подрібнювальні тіла у формі параболоїда обертання з плоскою основою, перпендикулярною осі параболоїда (а. с. № SU1606185A1, SU1715412A1).

Подрібнювальне тіло у вигляді бочки (а. с. № SU1599090A1), у тому числі з наскрізним осьовим отвором (пат. № FR635243A).

Подрібнювальне тіло у вигляді двох зчеплених між собою сплюснутих торів (пат. № UA129587U та UA136477U).

За ступенем складання розрізняють подрібнювальні тіла, виготовлені у вигляді окремих деталей, що є найбільш технологічними, а також тіла у вигляді складальних одиниць.

Тіло у вигляді складальної одиниці містить сферичну або циліндричну замкнену оболонку з розміщеною в ній вставкою неправильної форми, густина матеріалу якої відрізняється від густини матеріалу оболонки (пат. № RU2620271C1). Використання вказаного тіла із зміщеним центром тяжіння інтенсифікує процес подрібнення. Недолік конструкції – низька технологічність та висока вартість вставки зі сплаву на основі марганцю, нікелю або вольфраму.

Подрібнювальна куля містить нерухоме важке ядро й рознімну зносостійку оболонку, що складається з двох півсфер (пат. № CN202490655U).

Подрібнювальна куля зі зміщеним центром тяжіння складається з розміщених у спільній сферичній оболонці двох скріплених між собою кульових сегментів, виготовлених з матеріалів з різною густиною (а. с. № SU854437A1; рис. 19). Така конструкція тіла не лише забезпечує ефективне руйнування ударом, але й підвищує стиральний ефект тіла. Проте зазначена конструкція характеризується складністю виготовлення.

Технологічна у виготовленні порожниста куля складається з декількох частин, наприклад, двох півкуль, з'єднаних між собою діаметрально розташованим стрижневим елементом (пат. № FR1545233A, SU377992A3).

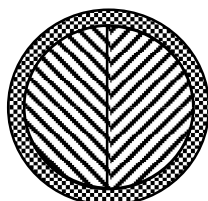


Рис. 19 – Подрібнювальне тіло згідно з а. с. № SU854437A1

Подрібнювальні тіла у вигляді циліндричної оболонки з вільно розміщеним всередині неї суцільним циліндром, виготовленим з матеріалу з густиною більшою, ніж у матеріалу оболонки (а. с. № SU587992A1, SU1662684A2).

Подрібнювальний стрижень виконано складеним у вигляді осердя зі стягнутим за допомогою гайок пакетом довгих змінних втулок, які в міру зношування можуть бути легко замінені (пат. № US1661567A).

Ефективне та просте подрібнювальне тіло у вигляді відрізка ланцюга дає змогу використовувати браковані або зношені ланцюги (пат. № FR589811A). При цьому кожне з тіл складається з однакових деталей – ланок ланцюга.

Аналогічні рішення запропоновано в пат. № UA129587U та UA136477U, а якому як подрібнювальне тіло використовують відрізок круглоланкового ланцюга, складеного з двох ланок бракованого та/або зношеного вантажного та/або тягового круглоланкового ланцюга (рис. 20).



Рис. 20 – Подрібнювальне тіло згідно з пат. № UA136477U

Подрібнювальне тіло має форму кулі з видаленими з нього частинами у вигляді однакових кульових сегментів, при цьому на плоских поверхнях кулі закріплено сферичні виступи, висота яких не перевищує висоти видалених кульових сегментів (пат. № RU2019999C1; рис. 21). Базову кулю виконано з термопластичного матеріалу з внутрішньою порожниною, заповненою пружно-пористим матеріалом, демпфування яким ударних навантажень знижує внутрішні напруження в тілі, підвищуючи термін його служби. Недолік конструкції – невелика маса й низька надійність фіксації сферичних виступів у базовій кулі.

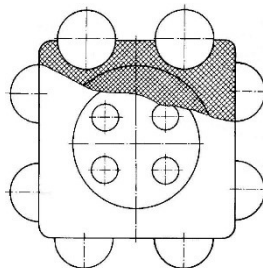


Рис. 21. Подрібнювальне тіло згідно з пат. № RU2019999C1

Подрібнювальні тіла аналогічної конструкції, але без внутрішньої порожнини (а. с. № SU1178481A1), а

також з виступами, з'єднаними між собою в об'ємі кулі гнучким зв'язком, наприклад, полімерним тросом (пат. № RU2038148C1).

Подрібнювальне тіло у вигляді складальної одиниці, що містить дві зчеплені між собою однакові деталі (пат. № UA129587U та UA136477U).

За ступенем рухливості елементів подрібнювальних тіл, виготовлених у вигляді складальних одиниць, розрізняють тіла з рухливими й нерухливими елементами.

Подрібнювальне тіло у вигляді кулі зі зміщеним відносно його центру важким ядром (а. с. № SU808141A1). У процесі роботи барабанного млина внаслідок безперервного зміщення в просторі центру мас тіло рухається за складною траєкторією, інтенсифікуючи подрібнення оброблюваної сировини.

Подрібнювальне тіло у вигляді перфорованої сфери з вільно розміщеними в ній кульками, діаметр яких перевищує діаметр отворів перфорації (пат. № CN206838227U, а. с. № SU1636047A1). У процесі роботи матеріал подрібнюється як зовнішньою, так і внутрішньою поверхнями сфери.

Тіло зі зміщеним центром тяжіння складається з двох півкуль із внутрішньою кільцевою канавкою між ними й вільно розміщеним у ній ядром (пат. № RU2642088C1). У процесі роботи ядро перекошується по канавці, змінюючи положення центру тяжіння тіла в цілому, що інтенсифікує процес подрібнення. Недолік подрібнювального тіла – складність конструкції.

Подрібнювальні тіла аналогічного принципу дії: у вигляді сталеві сфери зі зносостійким керамічним покриттям, армованим сіткою з керамічного волокна, та ексцентриковою порожниною з вільно розміщеною в ній свинцевою кулькою (пат. № CN204051808U), а також у вигляді сталеві сфери з термо- та зносостійким покриттям з політетрафторетилену та вільно розміщеним у її порожнині мідним ядром (пат. № CN203990796U).

Тіло у вигляді замкненої оболонки зі зносостійкого матеріалу, частково заповненої рідиною, яка в процесі роботи безперервно зміщує центр тяжіння тіла (пат. № UA120219C).

Подрібнювальне тіло стрижневого млина, виконане у вигляді довгого круглого стрижня з втулкою, вільно встановленою на стрижні на рівні розвантажувальних отворів барабана (а. с. № SU366009A1). Безперервно коливаючись, втулка своєчасно проштовхує подрібнений матеріал крізь розвантажувальні отвори барабана, підвищуючи надійність роботи млина в цілому.

Тіла у вигляді довгого круглого стрижня з вільно встановленими по всій його довжині циліндричними втулками (а. с. № SU1599088A1), а також конічними втулками, повернутими одна до одної по черзі меншими та більшими основами (а. с. № SU1650248A1). Недолік конструкцій – забруднення подрібнюваним матеріалом кільцевих зазорів між стрижнем і втулками.

За наявністю додаткових функцій розрізняють подрібнювальні тіла без додаткових функцій і тіла з додатковими функціями.

Подрібнювальне тіло у вигляді рознімної сферичної оболонки з п'єзоелементом, підсилювачем, друкованою платою, джерелом живлення та передавальною антеною (пат. № RU2146968C1). Під час роботи тіло може передавати інформацію про величину ударного прискорення, допомагаючи оператору регулювати режим подрібнення. Недолік конструкції – надмірна складність і висока вартість.

Ще складніші конструкції подрібнювальних тіл аналогічного принципу дії запропоновано в пат. № RU2146969C1, RU2199396C1 і RU66230U1.

За матеріалом розрізняють подрібнювальні тіла, виготовлені з металів та їхніх сплавів, кераміки (у тому числі фарфору), а також природних матеріалів [2]. Також для виготовлення подрібнювальних тіл використовуються полімерні й композиційні матеріали [12, 13], перероблення яких дає змогу одержувати тіла різного типорозміру практично за безвідходними технологіями [14, 15].

Як найбільш доступні тіла можуть бути використані природні кускові матеріали (зазвичай округлої форми), наприклад, морська галька [1, 2]. Їхній недолік – значний розкид за формою та розмірами.

Подрібнювальне тіло у вигляді кулі містить центральне ядро з шамоту, покрите оболонкою, що містить частинки речовин з твердістю не менше 6 за шкалою Мооса, наприклад, корунду, базальту, муліту, діабазу (а. с. № SU107137A1).

Найчастіше подрібнювальні тіла виготовляють з металів та їхніх сплавів, наприклад, сталі й чавуну ([1–3], пат. № RU2634535C1, сплаву урану з титаном (пат. № RU2427427C2), кобальтвмісного сплаву (пат. № RU2539742C1).

Подрібнювальна куля з вуглецевої сталі із загартованою поверхнею та зміцненою серцевиною (пат. № RU94169U1) характеризується високою зносостійкістю та міцністю.

Сталеві подрібнювальні тіла у вигляді відбракованих тіл кочення підшипників кочення (у формі кулі,

бочки, циліндра, зрізаного конуса; пат. № RU69773U1, RU70155U1), у тому числі з хромовмісної сталі ШХ15 (пат. № RU28636U1).

Штамповані подрібнювальні тіла з утилізованих залізничних рейок характеризуються високою зносостійкістю (пат. № RU36774U1).

Подрібнювальне тіло складається з оболонки та подовженого осердя з кінцями, що виходять за її межі. Осердя виготовлене з матеріалу з більш негативним електрохімічним потенціалом порівняно з електрохімічним потенціалом оболонкового матеріалу (а. с. № SU946659A1). Наприклад, цинкове осердя знижує корозію сталеві оболонки тіла, проте подрібнений матеріал забруднюється продуктами окиснення матеріалу осердя.

Тіло виготовлено з кераміки на основі діоксиду цирконію та оксиду ітрію (заявка № EP0908425A1), а також з додаванням діоксиду гафнію (заявки № EP0662461A1, FR2882749A1), що забезпечують гладкість та твердість тіла.

Подрібнювальне тіло у вигляді сфероїду виконане з оксиду цирконію, силікату цирконію, оксиду алюмінію, карбїду кремнію, нітриду кремнію або нітриду алюмінію (пат. № CN106140410A).

Металева подрібнювальна куля зі сферичною вставкою з кераміки, що поглинає гази, які виділяються під час лиття металу (заявка № EP0894533A1).

Подрібнювальне тіло кульової форми у вигляді важкого центрального ядра з оболонкою з більш м'якого матеріалу, здатного фіксувати частинки подрібнюваного матеріалу (пат. № RU2425734C2). У процесі подрібнення зазначені частинки заглиблюються в м'яку поверхню покриття подрібнювального тіла, в результаті чого надалі воно майже не піддається зношуванню.

Подрібнювальне тіло виконане з двох скріплених між собою півсфер, порожнину всередині яких заповнено рідким заповнювачем і містить важке ядро, що вільно рухається (пат. № RU2645327C1). Як рідкий заповнювач використовують тверду полімерну смолу, що переходить в рідину за умови підвищення температури, що полегшує виготовлення подрібнювального тіла. У процесі роботи внаслідок нагрівання тіл заповнювач переходить у рідкий стан, після чого внаслідок безперервно зміщуваного центру тяжіння подрібнювальне тіло рухається по складній траєкторії, інтенсифікуючи процес подрібнення.

Тіло містить важке ядро, розміщене в міцній сферичній оболонці зі склокерамічним покриттям, при цьому між оболонкою та ядром розташований демпфувальний шар, який компенсує різницю теплових розширень ядра та оболонки та знижує ударні навантаження на склокерамічне покриття (а. с. № SU390825A1, SU481309A2, SU772582A1, SU1673213A1).

Несферичне тіло, наприклад, у вигляді куба, виготовлено з полістиролу або поліаміду (заявки № WO2004/045585A1, EP1562551A1).

Подрібнювальна куля складається з центрального ядра й зовнішньої зносостійкої оболонки з поліамідного композиту (пат. № CN202061666U).

Кулясте тіло для подрібнення порохових сумішей складається зі сферичної оболонки, виготовленої з пресованої деревини, і гіпсового або алебастрового заповнювача (а. с. № SU66987A1). Оболонка, виконана складеною з двох частин, у процесі роботи унеможливує утворення іскор.

Тіло для подрібнення феромагнітних матеріалів містить вставки з магнітного матеріалу для утримання подрібнюваних частинок на подрібнювальному тілі (а. с. № SU1162486A1).

Подрібнювальна куля з карбїду вольфраму з діаметрально розташованою плоскою кільцевою ділянкою або двома діаметрально розташованими взаємно перпендикулярними плоскими кільцевими ділянками (пат. № GB634939A).

Стрижень зі зносостійкого чавуну з безперервною високоміцною стрижневою арматурою (пат. № CN2296771Y).

Висновки. Аналіз конструкцій подрібнювальних тіл барабанних млинів і дробарок для руйнування кускових і сипких матеріалів свідчить про їх значну різноманітність, проте найбільш затребуваними промисловістю залишаються традиційні подрібнювальні тіла у вигляді куль і циліндрів (коротких циліндрів – цильбеспів, а також довгих циліндрів – стрижнів).

При цьому найбільш перспективним напрямом вдосконалення подрібнювальних тіл барабанних подрібнювачів є розроблення спеціалізованих (а не традиційних універсальних) конструкцій подрібнювальних тіл, а також матеріалів для їх виготовлення.

Перспективи подальших досліджень. Надалі передбачено проаналізувати конструкції іншого технологічного й допоміжного обладнання електродного виробництва, а також шляхи підвищення його ефективності.

Список використаної літератури

1. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности. Москва : Химия, 1977. 368 с.
2. Шилаев В. П. Основы обогащения полезных ископаемых. Москва : Недра, 1986. 296 с.
3. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование. В 5 т. Т. 2. Механические и гидромеханические процессы / Д. А. Баранов, В. Н. Блиничев, А. В. Вязьмин и др.; под ред. А. М. Кутепова. Москва : Логос, 2002. 600 с.
4. Мікульонюк І. О. Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси та обладнання хімічної технології. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 340 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38169>
5. Mikulionok I. O. Classification of Roll Grinders for Lumpy and Bulk Materials (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2021. Vol. 56, No 11–12. P. 951–957. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00867-3>
6. Валкові дробарки і млини (Огляд конструкцій) / І. О. Мікульонюк, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, О. І. Іваненко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2022. № 1(21). С. 30–43. DOI: 10.20535/2617-9741.1.2022.254157
7. Чалых Е. Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий. Москва : Metallurgy, 1972. 432 с.
8. Чалых Е. Ф. Оборудование электродных заводов. Москва : Metallurgy, 1990. 238 с.
9. Сучасний стан проблеми складання колон заготовок електродів для їх графітування в печах прямого нагрівання / Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, І. О. Мікульонюк, О. І. Іваненко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2020. № 3(19). С. 7–12. DOI: 10.20535/2617-9741.3.2020.217899
10. Mikulionok I. O. Classification of the Tumbling Bodies of Rattlers (Tumbling Barrels) (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 57, No 9–10. P. 885–892. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01021-3>
11. ДСТУ 2415–94. Устаткування збагачувальне. Терміни та визначення. Київ : Держстандарт України, 1994. 63 с.
12. Chung D. D. L. Composite Materials: Science and Applications. London : Springer Verlag London Limited, 2010. 349 p. URL: https://www.academia.edu/36174278/Composite_Materials_Science_and_Applications
13. Микулёнок И. О. Классификация термопластических композиционных материалов и их наполнителей // Пластические массы, 2012. № 9. С. 29–38.
14. Mikulyonok I. O. Equipment for preparing and continuous molding of thermoplastic composites // Chemical and Petroleum Engineering. 2013. Vol. 48, No 11–12. P. 658–661. DOI: 10.1007/s10556-013-9676-x
15. Mikulionok I. O. Classification of Processes and Equipment for Manufacture of Continuous Products from Thermoplastic Materials // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Vol. 51, No 1–2. P. 14–19. DOI: 10.1007/s10556-015-9990-6

Igor Mikulionok, Anton Karvatskii, Serhiy Leleka, Olena Ivanenko

GRINDING BODIES OF DRUM MILLS AND CRUSHERS (Design review)

A classification of grinding bodies of drum grinders – mills and crushers – for the destruction of lumpy and bulk materials processed at enterprises of the chemical, mining, construction, food, metallurgical and electrode industries has been developed. A critical review of the most characteristic designs of grinding bodies of drum mills proposed by scientists, designers and inventors of the leading countries of the world has been carried out. The designs of grinding bodies are analyzed depending on the method of grinding, shape, degree of assembly, degree of mobility of the bodies elements, the presence of additional functions, as well as the material of the bodies and their structural elements.

An analysis of the designs of grinding bodies of drum mills and crushers for the destruction of lumpy and bulk materials indicates the presence of their significant diversity, however, traditional grinding bodies in the form of balls and cylinders remain the most used in industry. At the same time, the most promising direction for improving the grinding bodies of drum grinders is the development of specialized (rather than traditional universal) designs of grinding bodies, as well as materials for their manufacture.

In the future, it is planned to analyze the designs of other technological and auxiliary electrode production, as well as ways to improve its efficiency.

Keywords: *chemical technology equipment, enrichment equipment, drum mill, grinding body, classification, construction*

References

1. Sidenko, P. M. (1977). *Izmelcheniye v khimicheskoy promyshlennosti* [Grinding in the chemical industry]. Khimiya, Moscow, URSS. (Rus.)
2. Shilayev, V. P. (1986). *Osnovy obogashcheniya poleznykh iskopayemykh* [Basics of mineral processing]. Nedra, Moscow, URSS. (Rus.)
3. Baranov, D. A., Blinichev, V. N., Vyazmin, A. V., Zhikharev, A. S., Katalymov, A. V., Makarov, Yu. I., Mizonov, V. Ye., Orlov, V. A., Sokolov, V. I., Ushakov, S. G., Frolov, V. F., Chepura, I. V. (2002). *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. Yavleniya perenosa, makrokinetika, podobiye, modelirovaniye, proyektirovaniye. T. 2. Mekhanicheskiye i gidromekhanicheskiye protsessy* [Processes and devices of chemical technology. Transfer phenomena, macrokinetics, similarity, modeling, design. Vol. 2. Mechanical and hydromechanical processes]. Ed.: Kutepov A. M. Logos, Moscow. (Rus.)
4. Mikulionok, I. O. (2014). *Mekhanichni, hidromekhanichni i masoobminni protsessy ta obladnannia khimichnoi tekhnologii* [Mechanical, Hydromechanical, and Mass-Exchange Processes and Equipment in Chemical Engineering]. Kyiv : NTUU "KPI". URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38169> (Ukr.)
5. Mikulionok, I. O. (2021). Classification of Roll Grinders for Lumpy and Bulk Materials (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 56, no 11–12, pp. 951–957. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00867-3>
6. Mikulionok, I. O., Karvatskii, A. Ya., Leleka, S. V., Ivanenko, O. I. (2022). *Valkovi drobarky i mlyny (Ohliad konstruktсии)* [Roll Crushers and Mills (Design review)]. *Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnui instytut imeni Igoria Sikorskogo"; Himichna inzheneriia, ekologiia ta resursozberezhennia*, no 1(21), pp. 30–43. doi: 10.20535/2617-9741.1.2022.254157 (Ukr.)
7. Chalykh, Ye. F. (1972). *Tekhnologiya i oborudovaniye elektrodnykh i elektrougolnykh predpriyatiy* [Technology and equipment of electrode and electric coal enterprises]. Moscow : Metallurgiya. (Rus.)
8. Chalykh, Ye. F. (1990). *Oborudovaniye elektrodnykh zavodov* [Equipment for electrode plants]. Moscow : Metallurgiya. (Rus.)
9. Panov, Ye. M., Karvatskii, A. Ya., Leleka, S. V., Mikulionok, I. O., Ivanenko, O. I. (2020). *Suchasnyi stan problemy skladannia kolon zagotovok elektrodov dlia ikh grafituvannia v pechakh priamoho nahrivannia* [The Current State of the Problem of Assembling Electrode Blanks Columns for Their Graphitization in Direct Heating Furnaces] // *Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnui instytut imeni Igoria Sikorskogo"; Himichna inzheneriia, ekologiia ta resursozberezhennia*, no 3(19), pp. C. 7–12. doi: 10.20535/2617-9741.3.2020.217899 (Ukr.)
10. Mikulionok, I. O. (2022). Classification of the Tumbling Bodies of Rattlers (Tumbling Barrels) (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 57, no 9–10, pp. 885–892. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01021-3>
11. DSTU 2415–94. *Ustatkuvannia zbagachuvalne. Terminy ta vyznachennia* [Mineral processing equipment. Terms and definitions]. Kyiv, Derzhstandart Ukrainy, 1994. 63 p. (Ukr.)
12. Chung, D. D. L. (2010). *Composite Materials: Science and Applications*. London : Springer Verlag London Limited. URL: https://www.academia.edu/36174278/Composite_Materials_Science_and_Applications
13. Mikulionok, I. O. (2012). *Klassifikatsiya termoplasticheskikh kompozitsionnykh materialov i ikh napolniteley* [Classification of thermoplastic composite materials and their fillers]. *Plasticheskiye massy*, no 9, pp. 29–38.
14. Mikulyonok I. O. (2013). *Equipment for preparing and continuous molding of thermoplastic composites*. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 48, no 11–12, pp. 658–661. DOI: 10.1007/s10556-013-9676-x
15. Mikulionok I. O. (2015). *Classification of Processes and Equipment for Manufacture of Continuous Products from Thermoplastic Materials*. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 51, no 1–2, pp. 14–19. doi: 10.1007/s10556-015-9990-6