

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Міністерство освіти та науки України

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Міністерство освіти та науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ОСТАШКО ІГОР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.926.5

ДИСЕРТАЦІЯ

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІДЦЕНТРОВОГО МЛИНА ТА ПРОЦЕСІВ ПОДРІБНЮВАННЯ ТВЕРДИХ ЗАЛИШКІВ ПІРОЛІЗУ ЗНОШЕНИХ ШИН

05.05.13 – „Машини та апарати хімічних виробництв”

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ І.О. Осташко
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник:

Виноградов Борис Володимирович
доктор технічних наук, професор

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Осташко І.О. Обґрунтування параметрів відцентрового млина та процесів подрібнювання твердих залишків піролізу зношених шин – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.05.13 – „Машини та апарати хімічних виробництв”. Державний ВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» МОН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена задачі наукового вибору, розробці та обґрунтуванню основних параметрів розмельного обладнання для подрібнення твердого залишку піролізу (ТЗП) зношених автомобільних шин та дослідженню раціонального використання подрібненого продукту як заміника промислового технічного вуглецю.

Піроліз як один з перспективних методів утилізації зношених автомобільних шин дає декілька товарних продуктів, а саме: рідкий, газоподібний та твердий залишок. Найменшу товарну цінність представляє твердий залишок оскільки використання його в якості палива не дає суттєвого теплового ефекту. Саме тому проблема ефективного використання твердого залишку привертає увагу науковців. Відомі наукові роботи по використанню ТЗП в якості сорбенту для збирання розлитих нафтопродуктів на поверхні води та вигоряючої домішки в виробництві цементу. Також відомі спроби використання ТЗП як добавку в виробництві гум, але ці дослідження мають поверхневий характер і не розкривають суть проблеми його подрібнення.

Для використання ТЗП як технічного вуглецю його необхідно здрібнити до розміру близько 10 мкм. Оскільки клас близько 10 мкм відноситься до надтонкого подрібнення, вибір раціонального обладнання та його параметрів, що дають змогу отримати заданий клас продукту за найменших питомих енерговитрат, є перспективним науково-практичним завданням.

Отримані експериментальні данні щодо питомих енерговитрат на процес подрібнення твердого залишку піролізу зношених автомобільних шин помольним обладнанням, що реалізує різні механізми руйнування матеріалу. Показано, що найменші питомі енерговитрати на процес подрібнення досягаються у відцентровому млині. Таким чином, встановлено, що для подрібнення ТЗП доцільним є використання відцентрового млина, що реалізує ударно-стираючий механізм руйнування ТЗП.

Проведені дослідження впливу геометричних параметрів бильних елементів на інтенсивність подрібнення та питомі енерговитрати, на підставі яких розроблена та запатентована конструкція відцентрового млина та його робочого органу. Показано, що найбільша інтенсивність процесу подрібнення ТЗП відбувається на периферії помольної камери, в зоні 15-25 % від діаметру робочого органу. Найменші питомі витрати на подрібнення досягаються при робочому органі, що має чотири бильних елемента з зазором між ними складає 2-4 мм.

Для запатентованої конструкції відцентрового млина та робочого органу розроблено методику визначення споживаної потужності на процес подрібнення та вибору потужності двигуна при різних режимах роботи. Встановлено, що споживана потужність у процесі подрібнення лінійно залежить від частоти обертання робочого органу, та пропорційна середній крупності подрібнюваного ТЗП, в ступені 0,3.

З метою визначення надійності роботи робочого органу розв'язувалась задача напружено-деформованого стану. Система стаціонарних диференціальних рівнянь напружено-деформованого стану для ізотропного матеріалу, яка включає рівняння руху і рівноваги, геометричне рівняння – тензор нескінченно малих деформацій (Ейлера або Лагранжа), та фізичне рівняння – узагальнений закон Гука. Показано вплив особливостей геометричної конструкції та параметрів робочого органу на максимальне напруження в критичному перерізі. За результатами розв'язання задачі визначено граничну частоту обертання робочого органу з умови міцності.

Для виявлення резонансних режимів роботи та особливостей процесу пуску млина використовувалася система звичайних диференціальних рівнянь, що описує динамічні процеси в приводі млина.

Знаючи закон зміни моменту опору в часі, визначено потужність двигуна з умови нагрівання його обмоток до температури, що допускається. З цією метою було розроблено математичну модель динаміки приводу, яка крім часу пуску млина дає змогу визначити динамічні навантаження в механічній системі й вибрати його раціональні параметри. Показано вплив ступеня завантаження млина на час пуску.

Встановлено закономірності кінематики потоку гетерогенного середовища в помольній камері млина, взаємодії його з робочим органом та класифікації подрібненого матеріалу під час видалення з помольної камери проведено дослідження газодинаміки процесів у проточній частині відцентрового млина. Газодинамічні процеси у стисливому середовищі проточної частини відцентрового млина описувалися системою нестационарних рівнянь нерозривності, Нав'є-Стокса, енергії і рівняння стану в наближенні $k-\omega$ моделі турбулентності. Розбіжність між експериментальними та розрахунковими даними не перевищує 7 %, що підтверджує адекватність розробленої числової моделі.

Аналіз результатів математичного моделювання процесів у робочій камері показав, що потік повітря здійснює складний обертальний рух у повздовжньому та поперечному перерізах з утворенням локальних зон підвищеної турбулентності. У результаті числового моделювання та аналізу результатів виявлено, що в області робочого органу в поперечному перерізі повітряні потоки можна розділити на три групи, а саме: потоки перед робочим органом, що охоплюють зону на відстані 15-20 мм перед робочим органом; потоки за робочим органом, що охоплюють зону на відстані 60-70 мм за робочим органом; відносно незбурені потоки. Середня швидкість потоку матеріалу в зоні бильних елементів становить 12,6 м/с, а лінійна швидкість робочого органу 68,72 м/с. Таким чином, відносна швидкість зіткнення потоку матеріалу з бильними елементами становить 56 м/с, тобто 81,5 % від швидкості обертання робочого органу. Встановлено, що швидкість зіткнення

поток повітря і твердих частинок з більшими елементами робочого органу може бути апроксимована лінійною функцією з коефіцієнтом детермінації 0,99.

Продуктивність млина обумовлена двома чинниками: швидкістю утворення готового класу (швидкість подрібнення) та видалення з помольної камери готового класу. Тому, важливим науковим та практичним результатом є визначення залежності максимального розміру частинок, що видаляються з помольної камери від швидкості потоку та розрідження створеного на виході.

Важливим, з точки зору підвищення ефективності подрібнення, є те що повітря з частинками матеріалу, проходячи через зазори між більшими елементами, збільшують свою швидкість до 31 м/с, а в зоні більших елементів робочого органу утворюються турбулентні каверни, де матеріал концентрується та піддається інтенсивному подрібненню при взаємодії частинок матеріалу між собою і робочим органом.

Виконано дослідження кінетики процесу подрібнення твердого залишку піролізу у відцентровому млині, а також обґрунтовано основні напрямки використання продуктів подрібнення. Було отримані значення констант рівняння кінетики для різних цільових класів.

Проведено дослідження ефективності використання подрібненого ТЗП як заміника промислового технічного вуглецю. Показано, що в межах середнього діаметра ТЗП 63–9 мкм спостерігається, що еластичність та опір розриву модельних гум несуттєво залежить від дисперсності наповнювача; умовне напруження та опір роздиранню має нелінійну зворотну залежність; відносно подовження пряму нелінійну залежність від крупності подрібненого ТЗП.

Випробувано суміші для нашпальних прокладок рейкових шляхів, в умовах ТОВ «Інтер-ГТВ» показали, що використання ТЗП як заміника технічного вуглецю П 803 у кількості 50 % по масі дозволяє при збереженні усіх основних показників у межах вимог ДСТУ, крім того, ще підвищити діелектричну проникність гуми більше ніж на порядок.

Показано, що твердий залишок піролізу може бути використаний як опіснювач для виготовлення керамічних виробів. Використання керамічної суміші

з вмістом 2 мас.% подрібненого ТЗП, що дає змогу знизити усадку з 6,6 % до 4,2 % з одночасним підвищенням міцності на 6,57 МПа, водопоглинання з 0,5 % до 1,1 %, та знизити температуру випалу з 1100 °С до 1000 °С. Показано, що випалені керамічні зразки зберігають свій природній колір і відтінок, що є важливою властивістю для виготовлення керамічної цегли.

Ключові слова: відцентровий млин, твердий залишок піролізу, споживана потужність, кінетика подрібнення, числове моделювання, замітник технічного вуглецю, ресурсоенергозбереження.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях:

1. Виноградов Б. В. Об измельчении твердых остатков пиролиза изношенных автомобильных шин электрогидроимпульсным способом / Б. В. Виноградов, Д. А. Федин, В. И. Емельяненко, **И. А. Осташко** // Вопросы химии и химической технологии. – 2008, № 6. – С. 163–166.

2. Виноградов Б. В. Измельчение твердых остатков процесса пиролиза изношенных автомобильных шин в центробежной мельнице / Б. В. Виноградов, **И. А. Осташко**, В. И. Емельяненко // Вопросы химии и химической технологии №2 2009 С. 159-161.

3. Виноградов Б. В. Об энергетических характеристиках центробежных мельниц с S-образным рабочим органом / Б. В. Виноградов, **И. А. Осташко** // Вістник НТУ «ХПІ». – 2009. – № 25. – С. 64-69.

4. Виноградов Б. В. Повышение эффективности применения твердого остатка пиролиза изношенных шин в качестве наполнителя эластомерных материалов. / Б. В. Виноградов, Ю. Н. Ващенко, **И. А. Осташко**, В. И. Емельяненко // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – №1. – С. 199-202.

5. **Осташко І. О.** Аналіз міцності S-подібного робочого органу відцентрового млина / **І. О. Осташко** // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – №2. – С. 150-152.

6. Виноградов Б. В. Застосування роторно-імпульсного апарату для диспергування твердого залишку піролізу зношених автомобільних шин / Б. В. Виноградов, **И. А. Осташко** // Вістник НТУ «ХПІ». – 2010. – № 66. – С. 74-79.

7. **Осташко І. О.** Динаміка механічної системи відцентрового млина / **І. О. Осташко**, Б. В. Виноградов // Вопросы химии и химической технологии. – 2011. – №6. – С. 218-220.

8. **Осташко І. О.** Обґрунтування параметрів робочого органу відцентрового млина / **І. О. Осташко**, Б. В. Виноградов // Вопросы химии и химической технологии. – 2012. – №5 – С. 182–184.

9. **Осташко І. О.** Твердий залишок піролізу як енергозберігаюча добавка в технології будівельної кераміки / **І. О. Осташко**, Б. В. Виноградов, В. В. Коледа // Вістник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 59. – С. 80-85.

Статті у закордонних фахових виданнях:

10. **Осташко И. А.** Твердый остаток пиролиза как наполнитель резиновых прокладок рельсовых путей / **И. А. Осташко**, Б. В. Виноградов, Ю. Н. Ващенко // Промышленное производство и использование эластомеров – 2013. – №1. – С. 29-32.

11. Vinogradov B. Substantiation of key parameters of a centrifugal mill intended for grinding solid residue from the pyrolysis of used automobile tyres / B. V. Vinogradov, **I. O. Ostashko** // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. – 2016, 91, P. 133-141. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858.

12. **Ostashko I. O.** Aeromechanics of processes in the flow part of a centrifugal mill / **I. O. Ostashko**, B. V. Vinogradov // Acta Mechanica Slovaca. – 2017, Vol. 21, №3, P. 51-57. ISSN: 1335-2393.

Патенти України на винахід:

13. Пат. 90631 С Україна, МПК В02С 13/14. Відцентровий млин ударної дії / Виноградов Б. В. Ємельяненко В. І. Осташко І. О.; заявник та патентовласник

ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – №а200905165; заявл. 25.05.2009; опубл. 11.05.2010; Бюл. №9.

14. Пат. 91110 С Україна, МПК В02С 19/18. Пристрій для електрогідроімпульсного подрібнювання / Виноградов Б. В., Ємельяненко В. І. Осташко І. О.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – №а200810262; заявл. 11.08.2008; опубл. 25.06.2010; Бюл. №12.

15. Пат. 106127 С Україна, МПК В02С 13/286, В02С 18/08, В02С 18/22. Відцентровий млин / Гірін О. Б., Виноградов Б. В., Осташко І. О. Ємельяненко В. І.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – № а201212853; заявл. 12.11.2012; опубл. 10.10.2013; Бюл. № 19.

16. Пат. 106773 С Україна, В02С 13/14. Відцентровий млин ударної дії / Гірін О. Б., Виноградов Б. В., Осташко І. О.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – № а201206487; заявл. 29.05.2012; опубл. 27.08.2013; Бюл. № 16.

17. Пат. 106780 С Україна, В02С 13/14. Відцентровий млин / Гірін О. Б., Виноградов Б. В., Осташко І. О., Ємельяненко В. І.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – № а201208908; заявл. 19.07.2012; опубл. 27.08.2013; Бюл. № 16.

18. Пат. 108288 С Україна, С08L 9/06, С08L 17/00. Гумова суміш для виготовлення наспальних прокладок / Осташко І. О., Виноградов Б. В., Ващенко Ю. М., Гірін О. Б.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” - № а201309488; заявл. 29.07.2013; опубл. 25.04.2014; Бюл. № 8.

19. Пат. 109467 С Україна, В02С 13/14. Відцентровий млин / Гірін О.Б., Виноградов Б. В., Ємельяненко В. І., Осташко І. О.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” - № а201308263; заявл. 01.07.2013; опубл. 25.04.2014; Бюл. № 8.

Тези доповідей в збірках матеріалів конференцій:

20. Виноградов Б. В. Дослідження процесу подрібнення твердого залишку піролізу зношених автомобільних шин / Б. В. Виноградов, И. А. Осташко,

В. И. Емельяненко // IV Міжнародна науково-технічна конференція студентів аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології», 22-24 квітня 2009 року: збірник тез доповідей. – Дні-ськ. – 2009. – С. 250.

21. Виноградов Б. В. Повышение эффективности применения твердого остатка пиролиза изношенных шин в качестве наполнителя эластомерных материалов / Б. В. Виноградов, Ю. Н. Ващенко И. А. Осташко, В. И. Емельяненко // I Международная научно-практическая конференция и научно-техническая выставка-форум: «Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии. Проблемы и перспективы» тезисы (Одесса 28 сентября – 2 октября 2009) – С. 41-42.

22. Осташко І. О. Кінетика процесу подрібнення твердого залишку піролізу зношених автомобільних шин / І. О. Осташко, Б. В. Виноградов // Тези доповід. 5 Між народ. науково-технічн. Конф. „Хімія і сучасні технології”. Т.1. Дні-вськ. – 2011. 20 – 22 квітня. С. 36.

23. Осташко І. О. Числове моделювання аеродинамічних процесів у проточній частині відцентрового млина / І. О. Осташко, Б. В. Виноградов // Тези доповід. II Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем». Дніпро. – 2016. 1-3 листопада. – С 85-87. Особистий внесок здобувача: провів числове моделювання аеродинамічних процесів, аналіз результатів та зробив висновки.

24. Осташко І. О. Утилізація твердих залишків піролізу гумотехнічних відходів / І. О. Осташко, Б. В. Виноградов // Тези доповід. VII Між народ. науково-технічн. конф. „Хімія і сучасні технології”. Т.6. Дні-ськ. – 2015. – 27 – 29 квітня. – С. 100.

25. Виноградов Б. В. Измельченный твердый остаток пиролиза как наполнитель эластомерных материалов. / Б. В. Виноградов, Ю. Н. Ващенко, И. А. Осташко, В. И. Шувалова // Эластомеры: материалы, технология, оборудование, изделия, тез. докл. 8-я Украинская с международным участием научно-техническая конференция резинщиков –Дні-вськ, 2010. – С. 117–120.

26. Б. В. Виноградов, І. О. Осташко, Ю. Н. Ващенко, В. І. Емельяненко // Інформаційні технології, наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я тези доповіді XVIII міжнародна наук.-прак. конфер.: – Харків, 2010. – С. 206.

27. Vynohradov B. Non-Waste Disposal of Used Automobile Tires / Borys Vynohradov, Ihor Ostashko // Advanced Engineering Forum Vol. 25– 2017. P. 157-165. ISSN: 2234-991X. DOI: 10.4028.

ANNOTATION

Ostashko I.O. Substantiation of the parameters of a centrifugal mill and process of grinding the solid residue from pyrolysis of used tires - Research qualification work with the rights of a manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences (PhD) in the specialty 05.05.13 - "Machines and apparatuses for chemical industry." DVNZ "Ukrainian State University of Chemical Technology ", Ministry of Education and Science of Ukraine, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The thesis is devoted to a research-based choice, development and justification of the basic parameters of milling equipment for grinding solid residue from pyrolysis (SRP) of used tires and studying the use of the obtained product as a substitute for industrial technical carbon.

Pyrolysis, as one of the promising methods for the disposal of used tires, yields several commercial products, i.e. liquid, gaseous and solid residue. The lowest marketable value is the solid residue as its use as a fuel does not produce a significant thermal effect. Therefore, the problem of an effective use of the solid residue attracts the attention of scientists. There have been publications on the use of SRP as a sorbent for collecting spilled oil from the water surface and as a combustible addition in the production of cement. Also, attempts to use SRP as an additive in the production of rubber have been made, but these studies lack insight and do not reveal the essence of the problem of SRP grinding.

To be used as technical carbon, SRP needs to be ground to a size of about 10 microns. Since the class of about 10 μm falls under the category of ultrafine grinding, a promising scientific and practical goal is a selection of equipment and its operating parameters so as to obtain a specified class of product at the lowest specific energy consumption. Experimental data on the specific energy consumption in the process of grinding the solid residue from the pyrolysis of used automotive tires have been obtained on grinding equipment that uses various mechanisms of material destruction. It has been shown that the lowest specific energy consumption in the grinding process is achieved in a centrifugal mill. Furthermore, it has been found that the best option for grinding the SRP is a centrifugal mill that uses an impact-attrition mechanism for the destruction of the SRP.

The effect of geometrical parameters of beaters on the intensity of grinding and specific energy consumption has been investigated. The findings served as a basis for developing and patenting a centrifugal mill and its working body. . It has been shown that the process of grinding SRP is most intensive on the periphery of the grinding chamber, within the region of 15-25% of the working body diameter. The lowest specific power consumption for grinding is achieved with a four-beater working body, the clearance between the beaters being 2-4 mm.

For the patented design of the centrifugal mill and the working body, a method for assessing the power consumption during the grinding process and a technique for selecting the engine power under different operating conditions have been developed. It has been established that the power consumption in the process of grinding is linearly dependent on the rotational frequency of the working body, and is proportional to the average size of the solid particles, raised to 0.3 power.

To determine the performance reliability of the working body, a problem of the stress-strain state was solved. The system of stationary differential equations of the stress-strain state for an isotropic material was used, which included equations of motion and equilibrium, the geometric equation - the infinitesimal strain tensor (Euler or Lagrange), and the physical equation - the generalized Hooke's law. The influence of the geometrical design features and parameters of the working body on the maximum stress in the critical

section has been shown. The solution of the problem gave the limiting rotational speed of the working body from the strength condition.

In order to detect the resonance operating modes and features of the mill start process, a system of ordinary differential equations describing dynamic processes in the drive of the mill was used.

Knowing the law of the anti-torque moment variation in time, the power of the engine was determined from the condition of heating its windings to a permissible temperature. For this purpose, a mathematical model of the drive dynamics was developed, which, in addition to the timing of the mill, enables to determine the dynamic loads in the mechanical system and to select its rational parameters. The influence of the mill filling degree on the starting time has been shown.

The regularities of the kinematics of the heterogeneous medium flow in the grinding chamber of the mill, the flow interaction with the working body and the classification of the obtained material during its discharge from the grinding chamber were studied. The gas dynamics of processes in the flow part of the centrifugal mill was investigated. The gas-dynamic processes in the compressive medium of the centrifugal mill flow part were described by the system of non-stationary inhomogeneous equations, Navier-Stokes equations, energy and state equations in the approximation of the $k - \omega$ turbulence model. The discordance between the experimental and calculated data does not exceed 7%, which confirms the adequacy of the developed numerical model.

An analysis of the results of the mathematical modeling of processes in the working chamber showed that the air flow performs a complex rotational motion in the longitudinal and transverse sections with the formation of localized zones of increased turbulence. A numerical simulation and analysis of the results showed that in the vicinity of the working body, in the cross section, the air flows can be divided into three groups, viz. the flows in front of the working body, which occur at a distance of 15-20 mm in front of the working body; the flows behind the working body, which are observed at a distance of 60-70 mm behind the working body; and relatively undisturbed flows. The average flow rate of the material in the vicinity of the beaters is 12.6 m / s, and the linear velocity of the working body is 68.72 m / s. Consequently, the relative velocity of the

collision of the material flow with the beaters is 56 m / s, that is 81.5% of the rotational speed of the working body. It has been revealed that the velocity of collision of the air and solid particle flow with the beaters of the working body can be approximated by a linear function with a determination coefficient of 0.99.

The grinding capacity of the mill is due to two factors: the rate of formation of the finished class (rate of grinding) and rate of the finished class discharge from the grinding chamber. Therefore, an important scientific and practical result was revealing the dependence of the maximum size particles discharged from the grinding chamber on the flow velocity and rarefaction generated at the outlet. From the point of view of enhancing the grinding efficiency, it is important that, passing through the clearances between the beaters, the air flow together with the material particles increases its rate to 31 m / s, and forms turbulent cavities in the vicinity of the working body beaters, where the material concentrates and undergoes intensive grinding by interaction of the material particles with one another and the working body.

The kinetics of the process of grinding the solid residue from pyrolysis in a centrifugal mill was studied, and the main applications of the resulting products were substantiated. The kinetic equation constants for various target classes were obtained.

The efficiency of use of the ground SRP as a substitute for industrial technical carbon was studied. It has been observed that within the average SRP diameter of 63-9 μm the elasticity and rupture strength of the model rubber are insignificantly dependent on the filler dispersivity; the engineering stress and the tear resistance show a nonlinear inverse dependence; specific elongation exhibits a direct nonlinear dependence on the resilience of the SRP being ground.

Mixtures for railway sleeper pads were tested in the conditions of OJSC BZGTV; the tests showed that the use of SRP as a technical substitute for carbon P803 in the amount of 50% by weight allows not only to preserve all the basic parameters in compliance with DSTU, but, in addition, provides a further increase of the rubber dielectric constant by more than an order of magnitude.

It has been shown that the solid residue obtained from pyrolysis may be used as a desalter in the manufacture of ceramic products. The use of a ceramic stock containing 2

wt.% ground SRP reduces shrinkage from 6.6% to 4.2% with a simultaneous increase in strength by 6.57 MPa, water absorption from 0.5% to 1.1%, and allows reducing the firing temperature from 1100 ° C to 1000 ° C. It has been shown that fired ceramic samples retain their natural color and shade, which is an important property for the production of ceramic bricks.

Keywords: centrifugal mill, solid residue from pyrolysis, power consumption, kinetics of grinding, numerical simulation, technical carbon substitute, resource and energy saving.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1	23
СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	23
1.1 Проблема утилізації зношених шин.....	23
1.2 Способи утилізації зношених шин.....	25
1.3 Способи та пристрої, що використовуються у хімічній промисловості для тонкого подрібнення матеріалів	29
1.4 Теоретичні дослідження закономірностей процесу подрібнення.....	39
1.5 Постановка задачі дослідження.....	40
РОЗДІЛ 2	50
ОБҐРУНТУВАННЯ ТИПУ РОЗМЕЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ТВЕРДОГО ЗАЛИШКУ ПІРОЛІЗУ ЗНОШЕНИХ ШИН....	50
2.1 Загальні положення методики експериментів	50
2.2 Подрібнення у відцентровому млині	52
2.3 Подрібнення у кульовому кільцевому млині	55
2.4 Електрогідроімпульсне подрібнення ТЗП.....	57
2.5 Подрібнення в роторно-імпульсному апараті.....	60
2.6 Висновки.....	66
Перелік посилань.....	67
РОЗДІЛ 3	69
ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДЦЕНТРОВОГО МЛИНА	69
3.1 Відцентровий млин, конструкція та принци роботи	69
3.2 Обґрунтування раціональних параметрів робочого органу	71
3.2.1. Методика експерименту.....	71
3.2.2 Вплив форми периферійної зони робочого органу на ефективність подрібнення у відцентровому млині твердого залишку піролізу	72

3.2.3 Обґрунтування геометричних параметрів робочого органу відцентрового млина	74
3.3 Визначення моменту на робочому органі при роботі в однорідному середовищі	80
3.4 Експериментальне визначення моменту на робочому органі	85
3.4.1 Методика визначення споживаної потужності.....	85
3.4.2 Експериментальне визначення відносної кутової швидкості	89
3.4.3 Споживання потужності під час подрібнення	90
3.5 Розрахунок потужності млина	93
3.5.1 Неперервний процес подрібнення.....	93
3.5.2 Циклічний режим роботи	94
3.6 Дослідження напруженого стану робочого органу	97
3.7 Динаміка приводу відцентрового млина	109
3.7.1 Кінематична і динамічна схеми.....	109
3.7.2 Динаміка пуску.....	114
3.7.3 Визначення власних частот коливань механічної системи млина	114
3.7.4 Вибір потужності двигуна за часом пуску	118
3.8 Висновки	119
Перелік посилань.....	120
РОЗДІЛ 4	122
ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОДИНАМІКИ РОБОТИ ВІДЦЕНТРОВОГО МЛИНА	122
4.1 Геометрична модель відцентрового млина	122
4.2 Математична модель газодинамічних процесів у відцентровому млині.	123
4.3 Перевірка адекватності числової моделі та результатів моделювання	126
4.4 Загальний огляд газодинамічних процесів у робочому об'ємі	128
Висновки	136
Перелік посилань.....	136
РОЗДІЛ 5	137
КІНЕТИКА ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ТА НАПРЯМКИ ЗАСТОСУВАННЯ ТВЕРДОГО ЗАЛИШКУ ПРОЛІЗУ	137

5.1 Залежність гранулометричного складу подрібненого твердого залишку піролізу від часу подрібнення у відцентровому млині	137
5.2 Визначення дисперсності твердого залишку піролізу методами електронної мікроскопії	140
5.3 Закономірності процесу подрібнення твердого залишку піролізу у відцентровому млині.....	143
5.4 Твердий залишок піролізу як наповнювача гумових виробів.....	146
5.5 Твердий залишок піролізу як добавка до керамічної маси.....	152
5.6 Методика визначення основних параметрів відцентрового млина при проектуванні на задану продуктивність	154
5.7 Висновки	158
Перлік посилань	160
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	162
ДОДАТОК А.....	164
ДОДАТОК Б	168
ДОДАТОК В	170
ДОДАТОК В	171

ВСТУП

Актуальність теми. Накопичення великої кількості зношених автомобільних шин, що не піддаються природній деструкції, є однією з важливих проблем для екології та суспільства в Україні. Проблема утилізації відпрацьованих автомобільних шин останнім часом викликала зацікавленість громадськості та значної кількості приватних підприємців. Фундаментом для цього стало нагромадження величезних обсягів відпрацьованих шин, а також наявність економічно виправданого та технологічно простого способу їх утилізації методом піролізу. У результаті піролізу одержують рідкі й газоподібні вуглеводні, що використовуються як паливо, а також твердий залишок піролізу (ТЗП), котрий містить 80-90 % вуглецю. Вкрай вигідним з економічної точки зору є повторне використання твердого залишку як альтернативу промислового технічного вуглецю. Для застосування твердого залишку як технічний вуглець, необхідно здрібнити його до розмірів частинок близько 10 мкм. Оскільки клас близько 10 мкм відноситься до надтонкого подрібнення, вибір раціонального обладнання та його параметрів, що дають змогу отримати заданий клас продукту за найменших питомих енерговитрат, є перспективним науково-практичним завданням.

Таким чином, науково обґрунтований вибір параметрів відцентрового млина зі спеціальним робочим органом, що дає можливість подрібнювати ТЗП з мінімальними енерговитратами та розвантажувальним пристроєм, який дає змогу проводити первинну класифікацію подрібненого продукту, встановлення закономірностей споживання енергії залежно від конструкційних та технологічних параметрів млина, кінетики подрібнення, газо-механічних процесів руху гетерогенного середовища в робочій камері під час подрібнення та видалення готового продукту є актуальним науково-практичним завданням, яке має важливе значення для підвищення ефективності утилізації зношених шин та розвитку теорії розрахунку відцентрових млинів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до пріоритетних тематичних напрямів наукових

досліджень і науково-технічних розробок в Україні (Постанова Кабінету Міністрів України від 07.09.2011 р., № 942), а також згідно тематичних планів ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» і в межах науково-дослідної роботи (НДР). Дисертант, як виконавець брав безпосередню участь у виконанні НДР за темами «Розвиток теорії та створення нових енергозберігаючих способів, пристроїв та композиційних матеріалів в хімічній технології» (№ ДР 0108U001156), «Розробка обладнання для комплексної переробки гумових відходів у моторні палива» (№ ДР 0110U000044).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є аргументований вибір розмельного обладнання, наукове обґрунтування його основних конструктивно-технологічних параметрів, отримання кінетичних закономірностей процесу подрібнення, а також області ефективного використання тонкодисперсного ТЗП як технічного вуглецю.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

1. дослідження різних типів і вибір раціонального обладнання для подрібнення твердого залишку піролізу;
2. наукове обґрунтування вибраного обладнання та розробка методики розрахунків його основних параметрів;
3. визначення кінетичних залежностей та обґрунтування технологічних параметрів процесу подрібнення ТЗП;
4. встановлення напрямків застосування подрібненого твердого залишку піролізу як технічний вуглець для наповнення гумотехнічних виробів та кераміки.

Об'єкт дослідження – процес подрібнення та видалення твердих вуглецевмісних матеріалів у відцентровому млині.

Предмет дослідження – конструктивно-технологічні параметри відцентрового млина для подрібнення залишків піролізу гумовмісних відходів та можливість застосування одержаного продукту як технічного вуглецю.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використовувався комплекс апробованих методів дослідження, що включав: лазерно-дифракційний аналіз, електронну мікроскопію, оптичну мікроскопію та методи визначення адсорбції

дибутилфталата подрібненого твердого залишку піролізу; адекватні математичні моделі, зв'язані системи рівнянь механіки суцільного середовища, апробований математичний апарат методів скінченних елементів та скінченних об'ємів; стандартні методи та обладнання для тензометричного дослідження; статистична та математична обробка експериментальних даних на базі прикладних комп'ютерних програм; експериментальні дослідження в лабораторних умовах у відповідних профільних підрозділах ДВНЗ УДХТУ та заводських лабораторіях для перевірки ефективності застосування подрібненого ТЗП.

Наукова новизна отриманих результатів. У результаті виконаних у дисертації досліджень вперше отримані такі наукові результати:

– на базі математичного моделювання отримано розподіл поля швидкості та траєкторії потоків гетерогенного середовища в помольній камери млина під час взаємодії його з робочим органом, що є необхідним для модернізації наявного і створення нового обладнання хімічних виробництв та дало змогу визначити залежність гранулометричного складу частинок на виході з млина від геометричних параметрів його проточної частини;

– встановлено залежність споживаної потужності на процес подрібнення матеріалу від конструкційних та технологічних параметрів, а також від розмірів частинок ТЗП у помольній камері: зокрема потужність в степені 0,3 залежить від середнього діаметру подрібнюваного матеріалу;

– визначено залежність крупності подрібненого матеріалу, що видаляється з помольної камери від відносної витрати повітря, яка дорівнює відношенню витрати повітря до об'єму помольної камери;

– отримано залежності зміни гранулометричного складу ТЗП від тривалості подрібнення та встановлено значення констант рівняння кінетики під час подрібнення у відцентровому млині та роторному апараті;

– встановлено залежності показників якості гумових виробів, таких як міцність на розрив, еластичність, опір роздиранню та стійкість до старіння від середнього діаметру частинок подрібненого ТЗП, які використовуються як заміник технічного вуглецю.

– вперше встановлено, що кутова швидкість потоку тонкодисперсного середовища, що знаходиться в площині обертання робочого органу відцентрового млина лінійно залежить від його частоти обертання, при цьому коефіцієнт пропорційності для кожної точки потоку в залежності від її відстані до фронтальної поверхні робочого органу має своє значення, та коливається у межах 0,99-0,67.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено конструкцію відцентрового млина для подрібнення ТЗП та методику розрахунку його основних конструкційних та технологічних параметрів. Технічні рішення захищені патентами України на винаходи №№ 90631, 106127, 106773, 106773, 106780. Розроблено методику розрахунку потужності електродвигуна відцентрового млина для подрібнення ТЗП, в якій враховано геометричні параметри робочого органу, середній розмір частинок ТЗП та частота обертання ротора. З використанням числового скінченно-елементного аналізу виконано розрахунки робочого органу відцентрового млина на міцність. Розроблена методика дослідження динаміки відцентрового млина в період пуску. Розроблено нову рецептуру гумової суміші для виготовлення нашпальних прокладок (патент України на винахід № 108288). Доведена, можливість часткової заміни, до 50 %, технічного вуглецю П 803 на подрібнений ТЗП у рецептурі нашпальних прокладок рейкових шляхів за умови збереження фізико-технічних показників виробів у межах вимог чинної нормативної документації. Показано можливість підвищення на два порядки й більше діелектричної проникності гуми, в якій застосовується ТЗП. Результати дисертаційної роботи пройшли випробування та були передані на підприємство ТОВ «Інтер-ГТВ» (м. Біла Церква), що підтвердили промислову придатність розробок роботи.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи, що висвітлені в наукових положеннях, отримані особисто дисертантом. Дисертант особисто провів: аналіз джерел інформації, теоретичні та експериментальні дослідження, лабораторні випробування, обробку експериментальних даних, розробку методики розрахунку основних параметрів відцентрового млина, числове моделювання газодинаміки та розрахунок на міцність конструкції робочого органу.

Постановку мети і завдань дослідження, обговорення результатів експериментів та висновків виконано разом з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та отримали позитивну оцінку на: Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів і молодих вчених «Молода Академія» (Дніпропетровськ, 2008 р., 2010 р.); III Міжнародній науково-технічній конференції «Хімія і сучасні технології» (Дніпропетровськ, 2009 р., 2011 р., 2013 р., 2015 р.); I-й Международной научно-практической выставке-форуме „Современные энерго - и ресурсосберегающие технологии. Проблемы и перспективы.” (Одесса, 2009 г.); 8-й Украинской с международным участием научно-технической конференции „Эластомеры: материалы, технология, оборудование, изделия” (Днепропетровск, 2010 г.); Міжнародній конференції «Форум гірників» (Дніпропетровськ, 2014 р.).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 27 друкованих працях, з них 12 статей у фахових виданнях, у тому числі 3 статті у закордонних виданнях, з них 1 стаття індексується у світових наукометричних базах даних і системах, 7 патентів України на винахід, 8 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел літератури і додатків. Загальний обсяг складає 172 сторінок. Обсяг основного тексту становить 148 сторінок, з яких площа 3 сторінок повністю зайнята таблицями і рисунками. Робота містить 10 таблиць і 86 рисунків, список використаних джерел літератури складається із 110 найменувань.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Проблема утилізації зношених шин

Однією з важливих сучасних проблем промислово розвинених країн є утилізація та знешкодження твердих побутових відходів, котрі накопичуються у великій кількості і не піддаються природній деструкції на протязі тривалого часу [1-21]. У 2011 році, ПРООН оцінила, що вартість сировинного потенціалу в Україні складатиме 1,3 млрд. грн, у разі запровадження роздільного збору відходів та переробки сміття [1]. Вагому частку твердих побутових відходів займають відпрацьовані автомобільні шини [22–35]. Так за даними щорічний приріст зношених автомобільних шин на звалищах України складає близько 200 тис. тонн [22].

У США кожного року приріст зношених шин складає 1,9 млн. тонн, до того ж вже накопичено близько 2 млрд. тонн. У Англії щорічно утворюються близько 200 тис. тонн зношених шин, Японії 400 тис. тонн [36].

При спалюванні шин утворюються такі небезпечні хімічні сполуки як біфеніл, антрацен, флуоретан, пірен, бензапірен, що є сильними канцерогенами [37–45]. Викинуті на звалища, чи закопані зношені шини також є джерелом небезпеки, оскільки під впливом атмосферних опадів з них виділяються такі органічні сполуки як дифеніламін, дибутилфталат, фенантрен та інше, що призводить до забруднення ґрунту. Саме тому, Європейська Рада прийняла Директиву "Про звалища" у якій з 2003 року водиться заборона на спалювання зношених шин, а з 2006 року на захоронення різаних шин на території Євросоюзу [7].

Як видно з вищевказаного актуальною проблемою для більшості промислово розвинених країн, у тому числі й України, котра прагне вступити до Євросоюзу, є пошук економічно доцільного та екологічно прийняттого методу переробки

зношених автомобільних шин, що задовольняв би постійно зростаючі потреби в утилізації цього твердого побутового відходу.

Останнім часом все менше зношені шини підлягають захороненню. Зношені шини зберігаються як на змішаних звалищах з іншими відходами, так і на звалищах, призначених виключно для використаних автопокришок. Число тих, що зберігаються у всьому світі на звалищах шин оцінюється в мільярд штук [42]. Недоліки методів по переробці шин призводить до постійного збільшення їх кількості.

Відсутність контролю за відходами, підпали, самозаймання ведуть до тривалих пожеж на звалищах, які важко згасити. У 90-х роках це привело до спустошливих пожеж на звалищах шин в США і Канаді, де тільки в Онтаріо протягом місяця згоріло більш ніж 12 мільйонів шин. Звалище шин в Неуоре (Mid-Wales/Великобританія) горіло з 1992 по 1995 рр., та імовірно, продовжувало згодом горіти протягом 10 років через нові займання вогнищ пожежі [27]. Такі пожежі через високий рівень викидів газоподібних і рідких речовин ведуть до сильного забруднення повітря, верхнього шару ґрунту, ґрунтових вод [28].

У зношених автопокришках збирається дощова вода, а чорний колір шин веде до їх сильного нагрівання під впливом сонячних променів, який призводить до самозаймання. Таким чином, звалища шин утворюють ідеальне місце для розмноження хвороботворних організмів і є недооціненою небезпекою для здоров'я людей.

Негативно впливають звалища шин і на ландшафт. Інтенсивне захоронення зношених покришок веде в останні десятиліття до дефіциту наявної площі для звалищ. Створення нових захоронень може бути дозволене лише в обмеженій кількості або взагалі не дозволене, перш за все, в зв'язку зі зростаючим усвідомленням екологічної загрози.

Німецьке законодавство в області відходів ставить вивіз на звалище шин на останнє місце з можливих методів утилізації даного матеріалу. Якщо застосування іншого способу неможливе або недоцільно, автопокришки можуть бути захороненні. Наприклад, на території Бранденбургу у Німеччині забороняється

вивозити на звалище цілі шини, захороненню підлягають лише заздалегідь здрібненні автопокришки [30].

Постійні надходження зношених шин, і тих, що вже знаходяться на звалищах є невичерпним джерелом сировини, яка може бути надалі перероблена в кінцевий корисний продукт. Тому, актуальною задачею є підвищення ефективності методів утилізації та пошук ефективних напрямків використання продуктів переробки шин.

1.2 Способи утилізації зношених шин

У світовій практиці найбільш поширеним методом утилізації зношених автомобільних шин є їх спалювання з отриманням енергії [29]. На другому місці отримання гумової крихти [31], що використовується як добавка до синтетичного каучуку, та при будівництві доріг як наповнювач асфальту [33]. Але, ці методи, економічно та екологічно не є привабливими, у зв'язку з чим мають обмежене використання.

Останнім часом привертає увагу метод піролізної переробки гумових відходів зокрема зношених шин [40–45]. Основним стримуючим фактором широкого використання цього методу є недостатня його вивченість та низький економічний ефект від переробки, що пояснюється низькою вартістю отриманого продукту. Тому, для підвищення рентабельності цього методу утилізації постає задача подальшої переробки отриманого після процесу піролізу продукту з метою покращення його властивостей.

Подрібнення цільних зношених автомобільних шин є найбільш простим методом переробки, оскільки дозволяє максимально зберегти фізико-механічні та фізичні властивості гуми [46]. Однак використання кінцевого продукту переробки, а саме гумової крихти є економічно недоцільним, оскільки її собівартість після подрібнення та видалення металевого кордуну робить її занадто дорогою сировиною для використання у дорожніх покриттях. До того ж для використання у покриттях доріг чи бітумних мастиках необхідно мати однорідний склад здрібненої гуми, але

два однакових за розміром колеса, та різних виробників, при подрібненні дають абсолютно різну гумову крихту.

На протязі багатьох років було багато спроб об'єднати гуму з бітумами та асфальтами з метою її утилізації та надання в'язучим матеріалам гумоподібних властивостей [48]. Розроблено безліч технологічних схем прямого введення гуми в асфальтобетонні суміші, використання гумової крихти як наповнювача дорожньо-будівельних матеріалів. Однак з часом відбувалося поступове розбухання часток гуми, запертої в структурі асфальту. Покриття при таких внутрішніх напруженнях розущільнюється та швидко руйнується, а не зв'язані з асфальтом гумові часточки викидаються та розповсюджуються вітром, при цьому забруднюють навколишнє середовище.

У методах, заснованих на розкладанні і девулканізації гуми в бітумах при високих температурах, відбувається викид токсичних речовин, що містяться в гумі і утворюються в процесі. Одночасно низькомолекулярні каучукові фрагменти пластифікували бітум, знижуючи і без того низькі здвигові показники і адгезію. Крім того, низькодисперсна сажа з гуми, потрапляючи в бітум, ставала додатковим джерелом центрів кристалізації, різко знижуючи стабільність і стійкість до старіння асфальтних покриттів під дією чинників навколишнього середовища. З тих же причин не виправдали себе і способи введення в бітуми ультрадисперсних гумових порошоків з сильно розвиненою і модифікованою поверхнею. При введенні таких високоактивних добавок істотно змінювалися звичні прийоми поводження з бітумними сумішами, наприклад, різко скорочувався їх термін зберігання [34]. Окрім цього, внаслідок складності і малої ефективності методів отримання, така субмікронна маса має дуже високу собівартість.

Таким чином, більш ніж півстолітній негативний досвід застосування гумових відходів в дорожньому будівництві став причиною обмеженого використання, цього напрямку утилізації зношених шин.

Спалювання шин відбувається насамперед в цементній промисловості і на теплоелектроцентралях [35]. Шини використовуються тут як матеріал-замінник вугілля і мазуту.

Ряд недоліків спалювання шин лежить в самій природі даного методу. Температурні коливання в процесі горіння ведуть до неповного згорання шини. При цьому при температурі нижче 1100 °С утворюються такі отруйні речовини як хлорований діоксин і фуран. Відомо, що ці сполуки сприяють посиленню парникового ефекту. В процесі горіння утворюється близько 3,7 тонн CO₂ на тонну шин. У виробництві цементу кількість використуваних як паливо шин технологічно обмежена. Застосування в даному виробництві великої кількості старих автопокришок негативно впливає на якість цементу, оскільки сталь, що міститься в них, потрапляє в цемент як оксид заліза, та забарвлює його [35].

В Україні поки не відомі випадки надійних вимірювань викидів високотоксичного діоксину і фурану на цементних печах, що реально діють.

Спроби створення рентабельного підприємства по спалюванню використаних шин в теплоелектроцентралях потерпіли поразки внаслідок технологічних складностей, високих вимог з боку екологічного законодавства і невисокого ККД.

У зв'язку з необхідністю захисту навколишнього середовища і відповідними правовими розпорядженнями, установки по спалюванню використаних шин мають бути забезпечені устаткуванням, що обмежує викид шкідливих речовин в атмосферу. Великі капіталовкладення знижують економічну цінність автопокришки як енергоносія. Таким чином, втрачається економічна перевага від використання покришок у вигляді дешевого палива по відношенню до інших методів переробки.

У ряді країн (США, Великобританія, Франція та інші) спостерігається тенденція по обмеженню спалювання шин на користь інших способів переробки. Це обумовлено тим, що спалювання не є вирішенням проблеми утилізації відходів, а навпаки, стримує створенню і застосуванню нових методів переробки.

Відновлення шини — це її капітальний ремонт. З метою продовження терміну експлуатації автопокришки оновлюється або протектор шини, або як протектор, так і бічна частина шини.

Відновлення є екологічним способом. З одного боку, це веде до зменшення кількості відходів, з іншої — до економії природних ресурсів. Для відновлення шини необхідно в середньому близько 5 л сирової нафти, а для виробництва нової автопокришки — 35 л.

Визначальним для автовласників транспортних засобів є передусім, вигідне співвідношення витрат і терміну експлуатації. Відновлені шини легкових автомобілів використовуються в основному для автомобілів економного і середнього класів. У цьому класі в Німеччина попит перевищує пропозицію. Відновлені шини допущені до експлуатації тільки для автомобілів, що мають певну межу швидкості.

Загалом, частка ринку відновлених шин по відношенню до нових мала. З технічної точки зору відновлення шини не може повторюватися скільки завгодно раз, воно позначається на якості і безпеці експлуатації. Шина може бути відновлена не більше двох разів. Кожна відновлена шина неминуче перетворюється на зношену. Тому, відновлення є лише тимчасове, а не комплексне вирішення проблеми утилізації шин.

Піроліз, при своїй простоті втілення, дає декілька товарних продуктів [35-45]. В результаті процесу піролізу з утильної гуми отримують рідкий, газоподібний та твердий продукти. Газоподібний продукт як правило використовується для підтримання процесу піролізу, рідкий та твердий продукт продають як теплоносії, а металевий корд для переплавки на металургійні комбінати.

Основною перевагою піролізу перед іншими способами утилізації зношених шин є порівняно низькі капітальні витрати на обладнання, простота самого процесу, та відсутність потреби у висококваліфікованому персоналі для обслуговування установки. Саме ці переваги роблять піроліз економічно привабливими способом утилізації зношених шин.

Основні кінцеві продукти піролізу (рідка фаза та твердий залишок) хоч і використовуються в якості теплоносія, але мають невисоку вартість, оскільки рідкий продукт має у своєму складі додаткові масла та летючі компоненти, а твердий продукт має низький тепловий ефект при згоранні. Саме тому, для

підвищення рентабельності процесу піролізу необхідно обґрунтувати економічно доцільні шляхи використання продуктів отриманих в результаті переробки цим методом. Зокрема твердий залишок піролізу, що містить 80-87 % вуглецю найбільш раціонально повторно використовувати як аналог технічного вуглецю для наповнення еластомерів при виробництві гум, керамічних та композиційних матеріалів. Таким чином, може бути вирішено дві проблеми: перша підвищення вартості твердого залишку піролізу, а відповідно і рентабельності самого процесу; друга – утворення альтернативного джерела технічного вуглецю для вітчизняних виробників гумотехнічних виробів, що в більшості своїй змушені купувати технічний вуглець за кордоном (Росія, Іран).

Оскільки твердий залишок піролізу по своїй дисперсності (20–50 мм) та однорідності не відповідає промисловим маркам технічного вуглецю, то постає необхідність його надтонкого диспергування, що є важкою технологічною та технічною задачею. Тому, виникає задача визначення найбільш доцільного помольного обладнання з позиції вимог до дисперсності отриманого продукту, найменших питомих енерговитрат, надійності та простоти конструкції обраного обладнання.

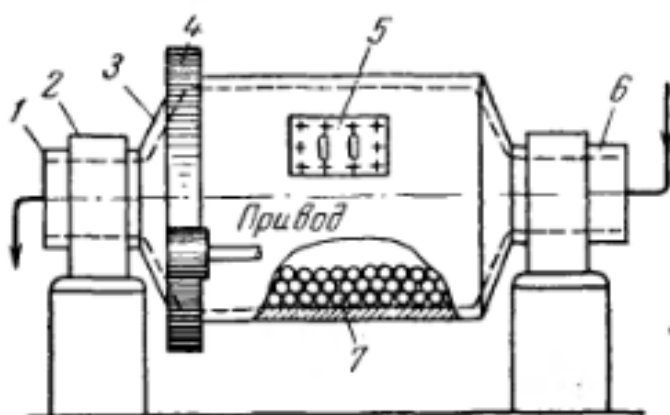
1.3 Способи та пристрої, що використовуються у хімічній промисловості для тонкого подрібнення матеріалів

Процес подрібнення характеризується високими капітальними та експлуатаційними витратами, а також високою енергоємністю самого процесу. Частка капітальних і експлуатаційних витрат на процес подрібнення у хімічній промисловості сягає 50-70 % від загальних витрат [46].

У хімічній промисловості використовують велику кількість обладнання для подрібнення різних матеріалів. Розмельне обладнання класифікують за крупністю готового продукту, принципу подрібнення та частоті обертання рухомих частин [47]. Відповідно до крупності готового продукту помольне обладнання підрозділяється на дробарки розміри продукту до 1-5 мм, та млини розміром

частинок менше 1 мм. За принципом подрібнення: ударної дії; стирання; роздавлювання; розламування; розколювання; та різні їх комбінація. По частоті обертання рухомих частин: тихохідні; середньохідні; швидкохідні.

Основним помольним устаткуванням для тонкого і надтонкого подрібнення різних видів мінеральної сировини є кульові барабанні млини (0). Вони порівняно прості в конструкції і зручні в експлуатації, забезпечують безперервний процес і високу тонину помелу. Проте ці млини мають деякі недоліки: велику металоємність та розміри, а відповідно низьку питому продуктивність; високі питомі енерговитрати при подрібненні неабразивних м'яких матеріалів; забруднення продукту подрібнення металевими продуктами зносу елементів млина [48-52]. Тому, барабанні млини не доцільно використовувати для подрібнення такого матеріалу як твердий залишок піролізу зношених автомобільних шин.



- 1 – пола цапфа вивідна;
- 2 – підшипник; 3 – барабан;
- 4 – приводна пара; 5 – люк;
- 6 – цапфа живлення;
- 7 – мелючі тіла (кулі)

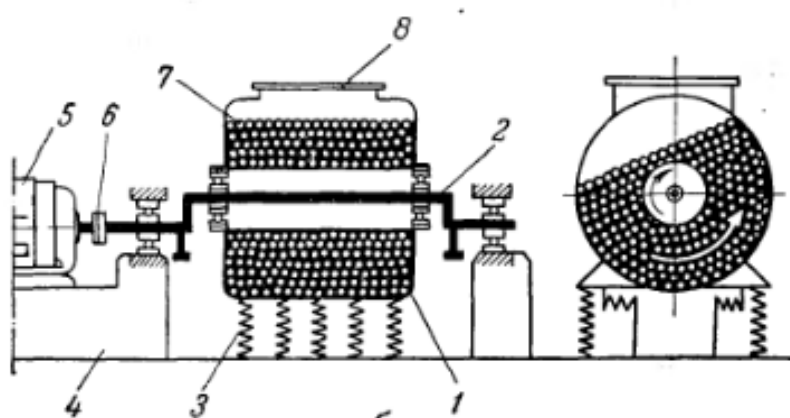
Рисунок 1.1 – Схема

однокамерного барабанного

кульового млина безперервної дії

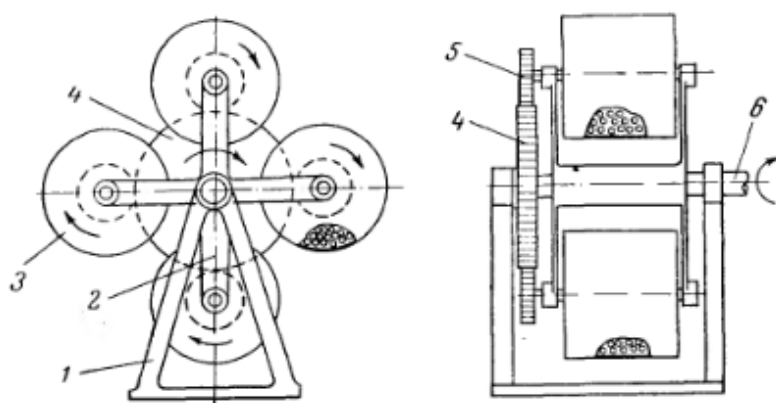
Для надтонкого подрібнення твердих матеріалів на останній стадії знайшли застосування вібраційні млини (рисунок 1.2). Питома продуктивність сучасних вібраційних млинів в 3-10 разів перевищує питому продуктивність кульових барабанних млинів [53]. Це обумовлює зниження капітальних витрат, експлуатаційних витрат і металоємності в 3-5 разів в порівнянні з кульовими млинами. Ефективність вібраційних млинів залежить від властивостей матеріалу, частоти і амплітуди коливань, твердості, розмірів і кількості куль, форми і об'єму помольної камери, ступеня заповнення її подрібнюючими елементами, умов його надходження і швидкості видалення готового продукту. Недоліком сучасних

вібраційних млинів безперервної дії є низька пропускна спроможність помольних камер, відносно велика металоємність, та забруднення продуктів помелу металевими включеннями.



1 – корпус; 2 – вібратор;
3 – опори; 4 – рама;
5 – електродвигун;
6 – муфта; 7 – мелючі тіла
(кулі); 8 – люк
Рисунок 1.2 – Схема
вібраційного млина з
внутрішнім вібратором

Планетарні млини (рисунок 1.3) використовують переважно в лабораторіях для колоїдного подрібнення. Перевага цих млинів у тому, що швидкість обертання планетарних млинів не обмежується критичним значенням, а продуктивність при заданій тонині помелу пропорційна кубу кутової швидкості водила. Оскільки відцентрові сили в планетарному млині можуть в 50 разів і більш перевищувати сили тяжіння, то і діаметри використовуваних куль можуть бути значно меншими, ніж у звичайному барабанному млині [54-58].



1 – станина; 2 – водило;
3 – барабанний млин;
4 – нерухоме зубчате колесо;
5 – приводна шестерня;
6 – ведучий вал.
Рисунок 1.3 – Схема
планетарного млина

Підвищений інтерес до планетарних млинів пояснюється тим, що вони займають площу на порядок менше, ніж традиційні кульові, їх маса також на порядок менше, вони не вимагають дорогих фундаментів, а їх обслуговування

обходиться в десятки разів дешевше. Всі ці переваги надзвичайно важливі, але головним все-таки є їх здатність отримувати особливо тонкий продукт, який в принципі не можна отримати на традиційних млинах. Проте вони не знайшли свого місця у промисловості через складність конструкції і відсутність технічних рішень з розробки надійної системи безперервної роботи барабана [55].

Усі описані вище подрібнювачі для тонкого помелу, мають загальний конструкційний елемент – кульове подрібнення, яке значно ускладнює конструкцію млинів, збільшують її металоємність, та енергоспоживання, а також забруднює продукти подрібнення.

Дезінтегратори застосовують для подрібнення неабразивних сипких матеріалів, його пропонують як альтернативу кульовим барабанним млинам для подрібнення малих партій матеріалу [56]. У дезінтеграторах руйнування відбувається за рахунок інтенсивної ударної дії на матеріал відбійних елементів, закріплених у роторах, що обертаються назустріч один одному. При цьому залежно від кута удару бив відбувається злам або зріз шматків матеріалу [57-58]. Проте ресурс роботи робочих органів дезінтеграторів, незважаючи на дослідження, що ведуться, по застосуванню для виготовлення бив новітніх зносостійких матеріалів, зокрема борированного титан-карбида, не перевищує 80...300 год. Тому міцність матеріалів, для руйнування яких можуть бути використані дезінтегратори, не перевищує 5 одиниць за шкалою Протодьяконова [55]. За принципом дії на подрібнюваний матеріал дезінтегратори подібні до відцентрових ударних млинів але конструкційно складніші, і мають більші питомі енерговитрати.

Прагнення позбавитися від недоліків млинів [59-63], що обертаються, привело до створення струміневих млинів, в яких кінетична енергія подрібнюваному матеріалу передається потоком повітря, пари, або продуктів згорання. Подрібнення здійснюється або при зіткненні зустрічних потоків частинок матеріалу, або при їх ударі об відбійну плиту. Деяка частка частинок подрібнюється дотичними ударами об внутрішні поверхні установки при розгоні або при транспортуванні по трактах пневмокласифікаційної системи. Перші конструкції струменевого млина були запатентовані ще в 1880 році, але вони не отримали

широкого поширення через високі питомі витрати енергії, значного зносу і відсутності високопродуктивних джерел дешевого енергоносія. В даний час відома велика кількість струменевих млинів різних типів, що відрізняються як видом енергоносія (повітреструменеві, парострумінні, газоструменеві), так і по конструктивним ознакам млини з вертикальною трубчастою камерою для надтонкого подрібнення матеріалів (середній розмір отримуваних частинок близько 1 мкм); млини з плоскою помольною камерою для надтонкого подрібнення матеріалів (середній розмір отримуваних частинок близько 10 мкм), та млини з протитковою (ежекторною) камерою для тонкого подрібнення матеріалів (середній розмір отримуваних частинок менше 60 мкм). Найбільш поширеними типами є двохструменеві протитокові млини з винесеним класифікатором. Газоструменеві і пароструменеві млини використовують для суміщеного помелу і сушки. До переваг процесу струменевого подрібнення належать такі: можливість руйнування найміцніших і абразивних матеріалів з підвищеним ступенем селективного розкриття, можливість створення агрегатів високої одиничної продуктивності (до 1500 т/год), простота конструкції і, як наслідок, можливість створення надійних агрегатів з повністю автоматизованим режимом роботи, низька металоємність і безшумність процесу. Недолік цих агрегатів – висока питома витрата енергії, яка більш ніж удвічі перевищує відповідні витрати кульових млинів.

Недостатньо досліджене таке обладнання для подрібнення як роторно-імпульсні апарати та електрогідроімпульсний (ЕГІ) метод диспергування. Тому, представляє інтерес дослідити їхню ефективність при подрібненні твердого залишку піролізу зношених шин.

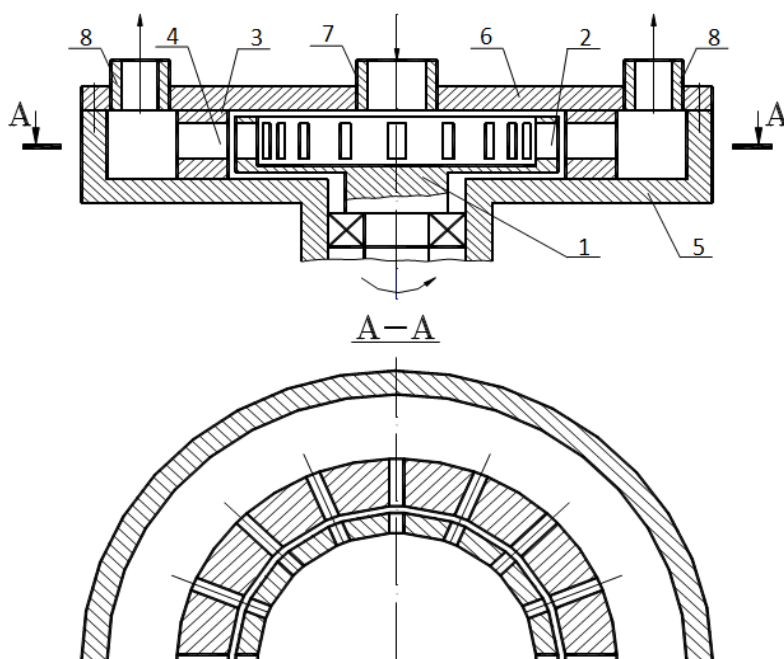
Роторно-імпульсні апарати (РІА) [64-67] є ефективними обладнанням для багатофакторного імпульсного впливу на гетерогенну систему з метою отримання сталих, високодисперсних емульсій та суспензій.

РІА використовуються для обробки таких систем як «рідина-рідина», «рідина-тверде тіло» та «газ-рідина» за рахунок широкого спектру факторів впливу: механічний вплив на частинки гетерогенного середовища, базується на ударах, зрізаючих та стираючих навантаженнях та контактах з робочими частинами

РІА; гідродинамічний вплив, виражається у великих зсувних напруженнях в рідині, розвиненій турбулентності, пульсаціях тиску та швидкості потоку рідини; гідроакустичний вплив на рідину реалізується за рахунок інтенсивної кавітації, ударних хвиль та нелінійних акустичних ефектів.

Характерною конструкційною ознакою РІА є присутність ротора та статора із зазором між ними 0,1 – 0,5 мм та великим кроком розташування каналів у роторі та статорі по їх боковим стінкам. Класифікація РІА дана в [65].

Стандартна схема РІА радіального типу наведена на (рисунку 1.4).



- 1 - ротор; 2 - канали ротора;
- 3 - статор; 4 - канали статора;
- 5 - корпус; 6 - кришка;
- 7 - вхідний патрубок;
- 8 - вихідний патрубок.

Рисунок 1.4 – Схема роторно–імпульсного апарату:

Швидкість струменя суміші в каналі статора є змінною величиною. При розповсюдженні в каналі статора імпульсу тиску, відразу за ним виникає імпульс зниженого («від'ємного») тиску, оскільки поєднання каналів ротора і статора завершилося, і подача рідини в канал статора відбувається лише за рахунок течії з радіального зазору між ротором і статором. Об'єм рідини, що піддається кавітації зростає при пониженні тиску до тиску насиченої пари оброблюваної рідини при даній температурі, та сплескується або пульсує при збільшенні тиску в каналі статора. Частина бульбашок кавітацій виноситься в робочу камеру. Акустична кавітація є ефективним засобом концентрації енергії звукової хвилі низької щільності у високу щільність енергії, пов'язану з пульсаціями і закриттям

бульбашок кавітацій. У фазі розрідження акустичної хвилі в рідині утворюється розрив у вигляді порожнини, яка заповнюється насиченою парою даної рідини. У фазі стискування під дією підвищеного тиску і сил поверхневого натягу порожнина закривається, а пара конденсується на границі поділу фаз. Через стіни порожнини в неї дифундує розчинений в рідині газ, який потім піддається сильному адіабатичному стисканню. У момент сплеску, тиск і температура газу досягають значних величин (за літературними даними до 100 МПа і 1000 °С). Після сплеску порожнини в доколишній рідині поширюється сферична ударна хвиля, швидко затухаюча в просторі.

У зв'язку з тим, що швидкість потоку рідини в каналі статора велика і має флуктуації, потік має розвинену турбулентність. При обертанні ротора в зазорі між ротором і статором виникає великі зсувні напруження. Робочі поверхні ротора і статора впливають на рідке гетерогенне середовище за рахунок механічного контакту, створюючи великі зсувні зусилля.

Роторно-імпульсні апарати як правило застосовуються як універсальне обладнання для одночасного диспергування і змішування, що є необхідним для виробництва надтонких пігментів.

Останнім часом виконано ряд досліджень по встановленню ефективності подрібнення матеріалів хімічної промисловості електрогідроімпульсним способом [68-73]. Основними перевагами цього методу є відсутність рухомих частин, що знижує знос обладнання, низьку ступінь забруднення матеріалу.

На (рисунку 1.5) приведена схема електрогідроімпульсної установки СВС-П для подрібнення спеків, яка також успішно експлуатується на дослідному виробництві Державного оптичного інституту ім. Вавілова для подрібнення кварцового скла і на Ленінградському абразивному об'єднанні [73]. Установка СВС-П розроблена для диспергування синтетичних алмазів і інших надтвердих матеріалів, як в періодичному, так і в безперервному циклах, а також для подрібнення мікропорошків і корегування форми зерен.

До переваг ЕГІ установок відносять можливість надтонкого подрібнення високоабразивних матеріалів. Недоліками є складність конструкції та налагодження неперервного режиму роботи, а також невисока продуктивність.

Відцентрові млини в останній час привертають до себе увагу все більшого числа дослідників процесу подрібнення як найбільш перспективне обладнання для диспергування низькоабразивних матеріалів. На (рисунку 1.6) представлена одна з типових схем відцентрового млина ударної дії [74-80].

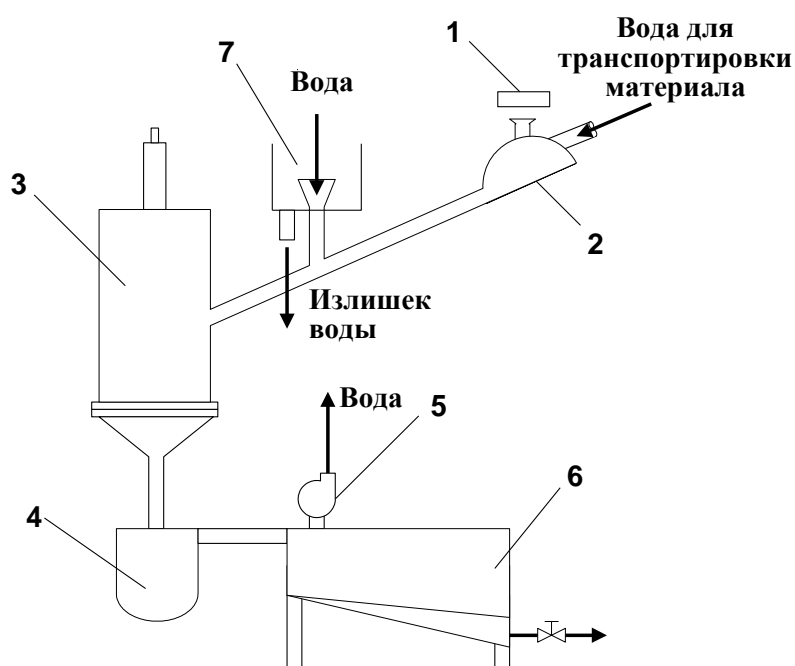
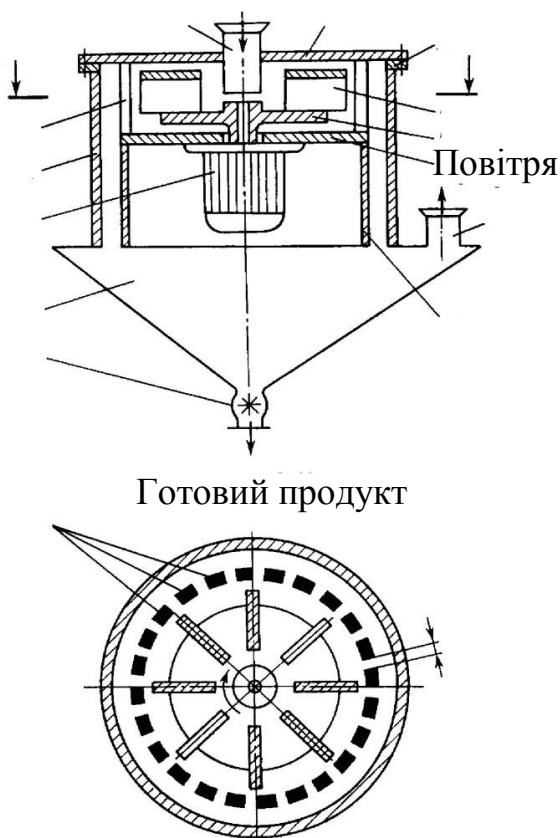


Рисунок 1.5 – Схема технологічного комплексу установки СВС-П: 1 - дозатор вихідного матеріалу; 2 - розширювач; 3 - подрібнювач; 4 - накопичувач; 5 - насос; 6 - відстійник; 7 - дозатор води.

Вихідний матеріал та повітря



1 – корпус; 2 – бункер; 3 – нижня плита; 4 – електродвигун; 5 – диск; 6 – лопаті; 7 – кришка; 8 – живлячий патрубок; 9 – відбивні стержні; 10 – патрубок видалення повітря; 11 – патрубок вивантаження готового продукту; 12 – внутрішня циліндрична обичайка; 13 – фланець.

Рисунок 1.6 – Схема роторно-відцентрового млина з інерційно-гравітаційним відвантаженням готового продукту

Принцип дії відцентрових млинів полягає в тому, що вихідний матеріал, потрапляючи на робочий орган, що обертається в горизонтальній площині, захоплюється радіальними лопатками і з силою відкидається на відбійне кільце, де і руйнується. Руйнування гравію, пісковику, вапняку за принципом вільного удару при швидкості зіткнення матеріалу з робочим органом до 75 м/с широко використовується в зарубіжній практиці [78-80]. Застосування відцентрових млинів для твердих матеріалів вимагає підвищення їх енергонапруженості, що стримується досягнутою межею швидкостей зіткнення.

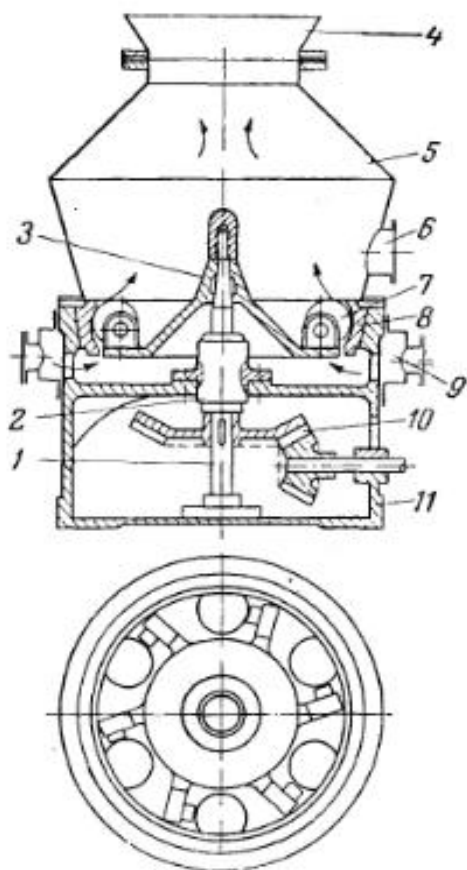
Англійською фірмою «Фуллер» [78] для тонкого подрібнення вугілля створений спеціальний відцентровий млин МРД «Мікрофуллер». Основними перевагами даного типу млина є відносні низькі питомі енерговитрати. Проте недоліком конструкції млинів цього типу залишається сильний знос лопатей і стінок камери подрібнення, армованих дорогою керамікою.

Таким чином, зважаючи на ряд переваг відцентрових млинів: відносно низькі питомі енерговитрати, простота конструкції, легкість реалізації неперервного

режиму роботи, даний тип млина є одним з найбільш перспективним для подрібнення твердого залишку пролізу зношених шин.

До млинів, що реалізують механізм роздавлювання і стирання матеріалу належать вертикальні середньоходні млини [78-80]. Вертикальні кульові млини бувають з шарами або валками. Подрібнення матеріалів у середньоходних вертикальних млинах відбувається за рахунок роздавлювання шматків матеріалу на радіальному столі, що обертається, за рахунок прижатих до матеріалу обертаючихся сталевих куль в середньоходових кульових млинах, або конічних валків в середньоходових валкових млинах. Схема середньоходового кульового млина представлена на (рисунок 1.7).

Середньоходовий вертикальний кульовий млин складається з розмельного столу 1, що обертається з частотою 60-300 об./хв, нерухомого верхнього кільця 3 і помольних сталевих куль 2 діаметром від 190 до 270 мм. Кулі знаходяться між верхнім кільцем і помольним столом із зазором 15-20 мм. Тиск куль на матеріал відбувається за рахунок маси шарів та верхнього кільця і головним чином за рахунок впливу 4-6 пружин 4, що тиснуть на верхнє кільце з навантаженням від 180 до 600 кг на кожне кільце.



- 1 – центральний вал; 2 – підшипники;
 3 – водило; 4 – сепаратор; 5 – кожух;
 6 – штуцер; 7 – шари; 8 – розмельне кільце;
 9 – короб для повітря; 10 – приводня пара;
 11 – корпус.

Рисунок 1.7 – Схема сереньоходового кульового млина:

Виходячи з основних властивостей твердого залишку піролізу таких як неабразивність та низька твердість, а також з вимог до мінімального забруднення подрібненого продукту, мінімальних питомих енерговитрат, розмірів, металоємності та простоти конструкції на думку автора представляє інтерес дослідити: відцентровий млин; роторно-імпульсний апарат; вертикальний-кульовий млин та електрогідроімпульсний апарат для подрібнення твердого залишку піролізу. До теперішнього часу відсутні дослідження процесів подрібнення твердого залишку піролізу зношених шин у зазначених типах млинів, тому постає задача дослідження ефективності застосування даного обладнання для подрібнення твердого залишку піролізу.

1.4 Теоретичні дослідження закономірностей процесу подрібнення

Процес подрібнення представляє собою руйнування твердих тіл під дією механічних впливів, ускладненою агрегацією дисперсних матеріалів, деформацією

подрібнюючих тіл, рідини чи газу. Це однаково справедливо як для млинів барабанного типу з будь-якими видами подрібнюючих пристроїв, так і для ударних, струменевих, кавітаційних та інших видів млинів. Задачею теорії подрібнення є встановлення взаємозв'язку між дисперсністю подрібненого матеріалу, його фізико-хімічними властивостями, витратами енергії та параметрами млина. Дослідження закономірностей подрібнення необхідно для розрахунку млинів і визначення оптимальних умов їх роботи.

Дослідження кінетики подрібнення є основною складовою дослідження процесу подрібнення. Загальноприйнятим математичним описом кінетичної залежності кількості класу готового продукту від часу подрібнення є вираз [87-90]

$$R_t = R_0 e^{-kt^m} \quad (1.1)$$

де R_t – кількість класу більшого за заданий клас через час подрібнення t , %;

R_0 – кількість класу більшого за заданий клас у вихідному матеріалі, %;

k – постійний параметр, що характеризує відносну швидкість подрібнення;

t – час подрібнення, с;

m – константа, що характеризує зміну відносної швидкості подрібнення в процесі подрібнення.

Константи k та m для кожного матеріалу і помольного обладнання мають свої значення, і саме визначення цих констант для твердого залишку піролізу при подрібненні його на досліджуваному обладнанні дасть можливість побудувати графіки кінетичних залежностей, що будуть відображати закономірності процесу подрібнення. Тому, з точки зору теоретичного обґрунтування процесу подрібнення твердого залишку піролізу зношених шин доцільним є перевірка адекватності цієї математичної інтерпретації кінетики процесу подрібнення, а також визначення її коефіцієнтів.

1.5 Постановка задачі дослідження

Оскільки на даний момент найбільш перспективним способом утилізації зношених шин є їх піроліз, то постає задача поліпшення властивостей продуктів,

що отримують цим методом утилізації. В рамках даної роботи поставлена мета визначення методів, та обладнання для подрібнення твердого залишку піролізу зношених шин, а також пошук раціональних сфер його застосування. Тому, поставлена мета обумовлює наступні задачі даної роботи:

– вибір та обґрунтування найбільш доцільного з наведеного вище розмільного обладнання для подрібнення і диспергування твердого залишку піролізу;

– наукове обґрунтування технічних і технологічних параметрів обраного обладнання та розробка методики його розрахунку;

– дослідження кінетики подрібнення твердого залишку піролізу;

– визначення ефективних шляхів застосування твердого залишку піролізу зношених шин.

Перелік джерел посилання

1. Дорогунцов, С. Е. Екосередовище і сучасність [Текст] : монографія. Т. 3. Економічна оцінка природного середовища / С. І. Дорогунцов, М. А. Хвесик, Л. М. Горбач, П. П. Пастушенко. – К. : Кондор, 2006. – 425 с. – ISBN 966-351-067-6.
2. Бобович, Б. Б. Переработка отходов производства и потребления [Текст] : Справочное издание / Б. Б. Бобович, В. В. Девяткин ; Под ред. док. техн. наук, проф. Б.Б. Бобовича. – М. : Интермет Инжиниринг, 2000. – 496 с.
3. Маковецька, Ю.М. Оцінка ресурсного потенціалу відходів: методологічні та методичні аспекти / Ю.М. Маковецька // Продуктивні сили і регіональна економіка. — 2008. — Ч. 1. — С. 217-222.
4. Удосконалення поводження з твердими побутовими відходами в системі підвищення економічного потенціалу регіону (на прикладі Полтавської області) / В.О. Онищенко, М.С. Самойлік // Продуктивні сили і регіональна економіка. — 2008. — Ч. 1. — С. 226-232.
5. Моніторинг стану забруднення довкілля суб'єктом господарювання / Е.Ф. Монастирська // Економічні інновації: Зб. наук. пр. — Одеса: ІПРЕЕД НАН України, 2012. — Вип. 47. — С. 131-142.

6. Повышение эффективности переработки изношенных автопокрышек в АР Крым / Ю.А. Хамрах // Культура народов Причерноморья. — 2010. — № 196, Т. 1. — С. 213-215.
7. Концепція Державної цільової науково-технічної програми «Утилізація твердих побутових відходів і знешкодження небезпечних відходів» // Наука та інновації. — 2008. — Т. 4, N 5. — С. 92-96.
8. «Державний автотранспортний науково-дослідний і проектний інститут»: від витоків до сьогодення [Електронний ресурс] // ДП «ДЕРЖАВТОТРАНСДІПРОЕКТ». — Режим доступу: \www/URL: <http://www.insat.org.ua/phpfiles/menu/about/>
9. Galvagno S, Casu S, Casabianca T, Calabrese A, Cornacchia G. Pyrolysis process for the treatment of scrap tires: preliminary experimental results. Waste Manag. 2002 P 17–23.
10. Шляхи підвищення потенціалу використання вторинних ресурсів / В.С. Міщенко, Ю.М. Маковецька // Продуктивні сили України. — 2009. — № 1. — С. 29-43.
11. Технології та обладнання для сфери поводження з побутовими відходами / О.Й. Шекель, Л.В. Шевченко // Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист. — 2010. — Вип. 1. — С. 84-89.
12. Мороз, О. В. Економічні аспекти вирішення екологічних проблем утилізації твердих побутових відходів [Текст] : монографія / О. В. Мороз, А. О. Свентух, О. Т. Свентух. — Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2003. — 110 с. — ISBN 966-641-070-2.
13. Гринин, А. С. Промышленные и бытовые отходы. Хранение, утилизация, переработка. [Текст] : монографія / А. С. Гринин, В. Н. Новиков — М. : ФАИР-Пресс, 2002. — 336 с. ISBN 5-8183-0442-6.
14. Краснянский, М. Е. Утилизация и рекуперация отходов [Текст] : учебное пособие для студентов вузов / М. Е. Краснянский. - 2-е изд., испр. и доп. — Харків : Бурун Книга, 2007. — 265 с. ISBN 978-966-8391-04-0.

15. Жадан, Л. В. Еколого-економічні проблеми утилізації твердих побутових відходів [Текст] / Л. В. Жадан, В. Ю. Верютіна // Вісник НТУ «ХП». – 2013. – №66 (1039). – С. 53-57. ISSN 2079-0767.
16. Буряк, Н.Б. Проблеми збирання, транспортування та утилізації твердих побутових відходів в Україні [Текст] / Н.Б. Буряк, С.В. Лукаш // Науковий вісник НЛТУ України. – 2012. – Вип. 22.5. – С. 82-89. ISSN 1994-7836.
17. Вепренцев И. В. Европейский поход к отходам / И. В. Вепренцев // Твердые бытовые отходы : Науч.-практ. журн. – 2006. – № 10. – С. 34–36.
18. Міщенко В. С. Інституціональний розвиток сфери поводження з відходами в Україні: на шляху європейської інтеграції / В. С. Міщенко, Ю. М. Маковецька, Т. Л. Омеляненко. – К.: ДУ «Інститут економіки природокористування та сталого розвитку НАН України», 2013. – 192 с.
19. Орлова Т. А. Экологическая оценка земельных участков, занятых объектами обращения с отходами / Т. А. Орлова // Містобудування та територіальне планування: наук-техн. збірник. – К. : КНУБА, 2006. – Вип. 25. – С. 167–181.
20. Управление твёрдыми бытовыми отходами. Раздельный сбор и сортировка отходов / Проект Европейского Сообщества INTERREG IIIA «Кооперация в совместном создании системы управления отходами в Псковской области». — 2008. — 97 с.
21. Використання альтернативного палива в цементній промисловості / М.А. Саницький, Т.Є. Марків, С.Я. Хруник, Т. М. Круць, К. Рецько // Теорія і практика будівництва. Вісник НУ “Львівська політехніка” – 2007. – № 600 – с. 258-264.
22. Екологічні аспекти спалювання вторинних паливних матеріалів у цементних печах / М.А. Саницький, С.Я. Хруник, О.Т. Мазурак, І.І. Кіракевич // Теорія і практика будівництва. Вісник НУ “Львівська політехніка” – 2007. – № 602 – с. 160-165.
23. Кім К. К. Новий метод утилізації автомобільних шин з металокордом / К.К. Кім, І.М. Карпова // Безпека життєдіяльності. – 2012. – №7. – С. 24 – 27.
24. Утилізація відпрацьованих автомобільних шин / Т.В. Петренко, Ю.О. Новічков, О.І. Позднякова, В.В. Хазіпова. – Донецьк : ДонНАБА, 2007. – 110 с.

25. Петренко Т.В. Перспективы использования продуктов пиролиза отработанных автомобильных шин / Т.В. Петренко, Ю.А. Новичков, Е.И. Позднякова // Материалы 5-го Международного конгресса управления отходами и природо-охранными технологиями ВЭЙСТЭК– 2007 г., 28 мая 2007 г. – М., 2007. – С. 153–155.
26. Перспективи утилізації відходів у цементній промисловості / М.А. Саницький, Т.Є. Марків, Я. Б'єнь, В. Бялчак // Матеріали наук.-практ. конф. “Енергозберігаючі технології. Застосування відходів промисловості в будівельних матеріалах та будівництві”. – К., 2004. – С. 112-118.
27. Biuletyn informacyjny Stowarzyszenia Producentów Cementu, Wyd. Polski Cement, Kraków, 2007.
28. Paliwa z odpadów // Praca zbiorowa pod red. Wandrasza J.W. i Nadziakiewicza J. – Gliwice: Wydawnictwo Helion, 1999. – tom II. – S. 10-21.
29. Grochowalski A. Nowoczesne metody termiczne jako jedyny, skuteczny sposób utylizacji odpadów niebezpiecznych w tym weterynaryjnych i szpitalnych // Mat. VI Konf. Nauk. “Dioksyny w przemyśle i środowisku”. – Kraków: Wydawnictwo Naukowe Politechniki Krakowskiej. – 2002. – S. 1-13.
30. Zolotov M., Zhdanyuk K., Zhdanyuk V. The influence of technological factors on bridge deck waterproofing when laying hot asphalt concrete protective and wearing courses // Ist Polish Road Congress. – Warszawa, 2006. – P. 491–498.
31. Золотов М.С., Жданюк К.В. Вплив порошкових і волокнистих наповнювачів на властивості бітумних гідроізоляційних мастик // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2007. – Вип. 15. – С. 53–58.
32. Модифицированные битумные вяжущие, специальные битумы и битумы с добавками в дорожном строительстве. PIARC-AIPCR / Пер. с франц. В. А. Золотарёва; П. А. Беспаловой; Под общей редакцией В. А. Золотарёва, В. И. Братчуна. – Харьков: Изд-во ХНАДУ, 2003–229 с.
33. Хлібишин Ю. Я., Почапської І. Я. Проблеми утилізації відпрацьованих автомобільних шин // Матеріали V науково-технічної конференції «Поступ у

нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості”. – Львів, 9–12 червня 2009 р. – С.146–147.

34. Кинетика распада озона в реакторе для разложения шин / В.И. Голота, О.В. Мануйленко, Г.В. Таран, А.С. Письменецкий, А.А. Замуриев, В.А. Беницкая, Ю.В. Доценко // Вопросы атомной науки и техники. — 2010. — № 4. — С. 204-209.

35. Dai X. Pyrolysis of waste tires in a circulating fluidized-bed reactor / X. Dai X. Yin, C. Wu, W. Zhang, Y. Chen // Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences. – 2001. – Vol. 26. – P. 385 – 399.

36. Булавин А.В., Пашкевич В.Н. Переработка отработанных автомобильных шин методом низкотемпературного пиролиза. / Научные труды Донецкого национального технического университета. // Химия и химическая технология. Выпуск 95. – Д:Лебедь, 2005. – с. 98 – 102.

37. Williams P.T., Besler S., Taylor D.T., Bottril R.P. The pyrolysis of automotive tyre waste // Journal of the Institute of Energy, 1995 vol.68.- №474-P.11-12.

38. Переработка изношенных шин: Монография / Э. М. Соколов, Б. Н. Оладов, Н. И. Володин, В. А. Тимофеев, Н. М. Качурин, М. А. Иваницкий; Тул. гос. ун-т; Тула, 1999 134 с.

39. Ахметзянов, Ш.Х. Пиролиз изношенных шин: современное состояние и перспективы применения его продуктов / Ахметзянов, Ш.Х. Минхайдарова Г.В., Мирясова Ф.К., Мухутдинов А.А., Тахаутдинов Ш.Г. // Научный Татарстан, 2003.- №3-4-С.100-106.

40. Roy C., Darmstadt H. Conversion characteristics of Canadian coals subjected to vacuum pyrolysis treatment // Plastics Rubber and Composites Processing and Applications, 1998.-27. №7.-С.341-345.

41. Choi Kyung-Soo, Pak Dong-Wha. Combustible gas production from waste tire pyrolysis process by thermal plasma // 8th Congr. Asian Pacif. Confederat. Chem. Eng., 1999.- v.1.- С. 579-582.

42. Ключ, В. П. Энергоэффективная переработка амортизированных шин в альтернативное топливо [Текст] / В. П. Ключ // Energetica. — 2014. — № 4. — С. 125–128.

43. Півняк Г.Г. Сучасний стан і перспективи подальшого розвитку електроприводів потужних барабанних млинів // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Вестн. Хар. гос. политех. ун-та. – 1998. – С. 24–27.
44. Виноградов Б.В. The stiffness of the open gearing of tumbling mill / Б.В. Виноградов, Д. А. Федин // Науковий вісник НГУ, 2016, № 2 – С. 24-29.
45. Shiven He Modeling and dynamics analysis of planetary gear transmission joints with backlash / Shiven He, Qinxuan Jia, Gang Chen, Hanxu Sun// International Journal of Control and Automotion. – 2015. –Vol. 8. – No 2. – P. 153–162.
46. Виноградов Б.В. Динамічна модель приводу барабанного млина в сталому режимі роботи. // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 3. – С. 72-76.
47. Андреев А.А. О модели процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице. // Обогащение руд. – 2009. – №4. – С. 3-7.
48. Дырда В. И. Резиновые футеровки технологических машин / В. И. Дырда, Р. П. Зозуля. – Москва – Днепропетровск, 2013. – 237 с.
49. Калганков Е. В. Расчет долговечности резиновых футеровок шаровых рудоразмольных мельниц с учетом старения резины / Калганков Е.В. // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. Праць, Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2013. – № 113. С. 181–202.
50. Park S., Baker J. O., Himmel M. E. et al. Cellulose crystallinity index: measurement techniques and their impact on interpreting cellulase performance // Biotechnology for fuels. 2010. V. 3. N P. 10.
51. Scherrer P. Bestimmung der Grösse und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen // Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. 1918. V. N 2. P. 98-100.
52. Klass D. L. Biomass for Renewable Energyю Fuels and Chemicals // Encyclopedia of Energy. Volume 1 / Cutler J. Cleveland. San Diego: Elsevier, 1998. P. 193–212.
53. Deutschmann R.,Dekker R. F. H. From plant biomass to bio-based chemicals: Latest developments in xylan research // Biotechnology Advances. 2012. V. 30. N 6. P. 1627–1640.

54. Цегельский В.Г. Двухфазные струйные аппараты. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 408 с.
55. О критериях акустического мониторинга струйного измельчения / Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, И. А. Шуляк, Б. Ф. Бевзенко // Техн. механика. — 2009. — № 3. — С. 116–121.
56. Информационная технология получения тонкодисперсных материалов струйным измельчением / Н. С. Прядко, Т. М. Буланая, Л. Ж. Горобец и др. // Системные технологии: региональный межвузовский сб. науч. тр. — 2010. — Вып. 3(58). — С. 40–46.
57. Акустические и технологические характеристики процесса измельчения в струйной мельнице // П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко, Н. С. Прядко // Изв. вузов. Горный журнал. — 2009. — № 4. — С. 15–121.
58. Интенсификация процесса струйного измельчения на основе анализа акустических параметров / Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, И. А. Шуляк, Н. И. Соболевская // Вибрации в технике и технологиях. — 2009. — № 2(54). — С. 15–19.
59. Промтов, М. А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. [Текст] / М. А. Промтов. – М.: Машиностроение, 2001. – 260 с.
60. Піроженко, І. А. Гідродинаміка та теплові ефекти в циліндричному роторно-пульсаційному апараті [Текст]: дис. кандидата техн. наук / І. А. Піроженко. – К., 2005. – 161 с.
61. Балабудкин, М. А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности [Текст] / М. А. Балабудкин //— М. Медицина, 1983. – 159 с.
62. Промтов, М.А. Применение роторного аппарата для утилизации отходов микробиологических производств [Текст] / М.А. Промтов, В.М. Червяков, Ю.В. Воробьев // Процессы и аппараты микробиологических производств : тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф., – М., 1989. - С. 172-186.
63. Мазуровский Б. Я. Электрогидроимпульсная запрессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов. – Киев : Наук. думка, 1980. – 172 с.

64. Качанов Д.П., Лупал С.Д. Электрогидравлическое дробление твердых и сверхтвердых материалов // Электронная обработка материалов. – 1985. – №5. – С. 90–91.
65. Бакуль В.Н. Способ дробления сверхтвердых материалов / Бакуль В.Н., Никитин Ю.И., Уман С.М., Виноградов В.М., Лисица В.И., Несветайлов Г.А. // Электронная обработка материалов. – 1986. – №3. – С. 55–60.
66. Малюшевский П.П. О механизме тонкого измельчения материалов при электрическом взрыве в ограниченном объеме // Электронная обработка материалов. – 1982. – №3. – С. 58–63.
67. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. – М.: Наука, 1971. – 151 с.
68. Малюшевский П.П. Электровзрывной способ измельчения искусственных неметаллических материалов / Малюшевский П.П., Толстых А.Б., Волкова Л.Б., Харитонов В.Я. // Электронная обработка материалов. – 1982. – №2. – С. 55–60.
69. Опыт применения центробежно-ударных измельчителей: Обзор. информ./ Центр. науч.-исслед. ин-т информ. и техн.-эконом. исслед. черной металлургии. М., 1991.
70. Пугин К.Г. Определение параметров и производительности роторных мельниц интенсифицирующего действия: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1994.
71. Гарабажиу А.А., Левданский А.Э. Аэродинамика движения частиц измельчаемого материала в рабочей камере роторно-центробежной мельницы // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и хим. технол. 1999. Вып. VII. С. 15-27.
72. Гарабажиу А.А., Левданский А.Э. Разработка и исследование вихревой мельницы с непрерывной проточной классификацией готового продукта // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технол. неорган. в-в. 2000. Вып. VIII. С. 292-305.
73. Шишков Н.И. Исследование совмещенных процессов измельчения и сушки в мельнице ударно-отражательного действия / Шишков Н.И., Опарин С.А., Сорока П.И., Зражевский В.И. // Матеріали V Міжнародної науково-практичної

конференції “Наука і освіта – 2002”.- Том 19.- Дніпропетровськ - Донецьк. - 2002.- С. 49-50.

74. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности . – М.: Химия, 1977. – 367с.

75. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов.- М.: Стройиздат, 1972.- 240 с.

76. Бардовский А.Д., Летин Л.А., Кряжев Н.М., Дерба И.И., Пухучкин Е.В. Определение параметров центробежной мельницы роторно-струйного измельчения при помоле отходов карбонатного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень - М.: МГГУ, 2002.-№1- С. 204-206.

77. Перевалов В. С, Бардовский А, Д., Кряжев Н. М. Оптимизация формы рабочей поверхности разгонных роторов центробежной мельницы // Материалы сорокового симпозиума «Моделирование в механике» в Силезском техническом университете - Польша, 2001 -№17-0.157-162.

78. M. Mazurkiewicz, D. Summers. Coal disintegration and beneficiation by high pressure waterjets // Проблемы создания экологически чистых и ресурсосберегающих технологий добычи полезных ископаемых и переработки отходов горного производства: 1-ая Международная конференция.- Тула, 1996.- С. 78-84.

79. Богданов, В.В., Эффективные малообъемные смесители [Текст] : монография / В.В Богданов, .Е.И. Христофоров, Б.А. Клоцунг – Л.: Химия, 1989. – 224 с.

80. Андреев С.Е. Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава // С.Е. Андреев, В.В. Товаров, В.А. Перов / М. Metallurgizdat. – 1959. – 437 с.

РОЗДІЛ 2

ОБҐРУНТУВАННЯ ТИПУ РОЗМЕЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ТВЕРДОГО ЗАЛИШКУ ПІРОЛІЗУ ЗНОШЕНИХ ШИН

2.1 Загальні положення методики експериментів

Експериментальні дослідження процесу подрібнення проводилися з метою встановлення раціонального обладнання, що дає змогу отримати продукт подрібнення ТЗП розміром близько 10 мкм. Основними критеріями вибору є: питомі енерговитрати; максимальна дисперсність продукту, що досягається; продуктивність при рівних об'ємах та часу подрібнення; мінімальна металоємність та простота конструкції.

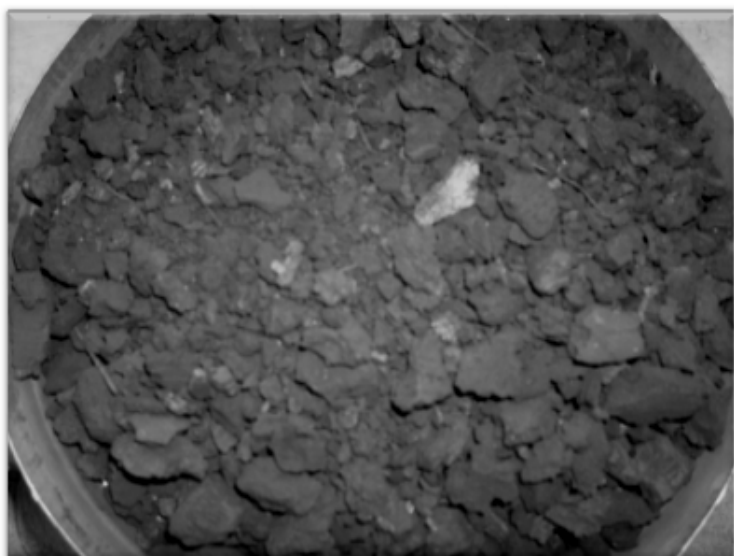


Рисунок 2.1 – Вихідний твердий залишок піролізу

Вихідним матеріалом для подрібнення був твердий залишок піролізу (рисунок 2.1), попередньо з якого магнітним сепаратором було видалено металевий корд.

Для аналізу початкового гранулометричного складу були використані методи ситового аналізу [81]. Використовувався сепаратор СПЕ та набір сит з розмірами сітки: 0,5; 0,8; 1; 2; 3; 4; 5; 7; 10; 15; 20;30;40;50 мм. В цілому для ситового аналізу в залежності від гранулометричного складу досліджуваного матеріалу, окрім

вищенаведених, використовувались сітки розмірами 0,04; 0,05; 0,063; 0,08; 0,1; 0,16 мм.

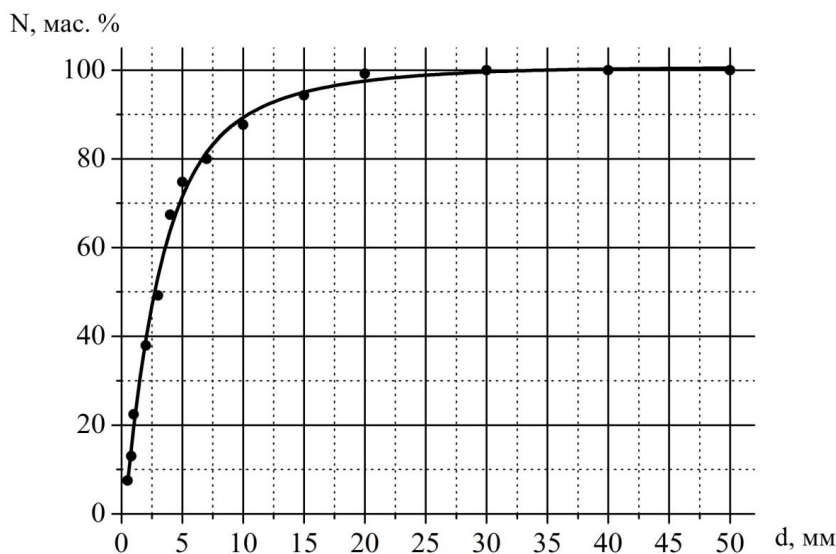


Рисунок 2.2 –
Гранулометричний склад
вихідного матеріалу

Для подрібнення у відцентровому та вертикальному кульовому млині початковим матеріалом було взято вихідний продукт, а для ЕГІ та РІА попередньо подрібнений у відцентровому млині матеріал та відсіяний клас менше 100 мкм.

Окрім ситових методів для аналізу ефективності процесу подрібнення було використано метод визначення коефіцієнту адсорбції дибутилфталату ДБФ [82], як показника структурності подрібненого матеріалу. Оскільки показник структурності є універсальним критерієм, що характеризує дисперсність, поверхневу активність та сумарну утворену поверхню технічного вуглецю, то цей метод використовувався для аналізу продуктів усіх досліджуваних методів подрібнення.

Для оцінки впливу питомих енерговитрат на процес подрібнення до експерименту визначали масу матеріалу завантаженого в млин (m , г) і потужність холостого ходу млина (N_x , Вт), а під час експерименту фіксували робочу потужність млина (N_p , Вт) і час роботи (t , с). Питомі енерговитрати для кожного експерименту визначалися по формулі (2.1).

$$E = (N_p - N_x) \cdot \frac{t}{m} \text{ (Дж/г)} \quad (2.1)$$

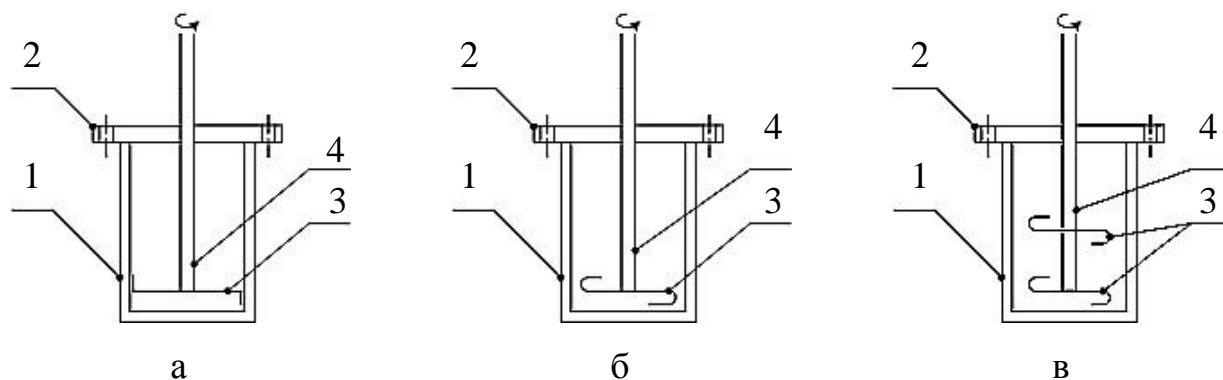
Для об'єктивного зіставлення досліджуваних методів подрібнення за критерієм габаритів, об'єм камери подрібнення для усіх методів був однаковий і становив 1

дициметр кубічний, ступінь заповнення вихідним матеріалом також був однаковий. Таким чином, в експерименті при рівних габаритах порівнювались питомі енерговитрати та ефективність подрібнення за критерієм адсорбції дибутилфталату.

2.2 Подрібнення у відцентровому млині

Як зазначалося у літературному огляді відцентровий млин є одним з перспективних обладнань для диспергування такого м'якого матеріалу як ТЗП. Досліджувався вплив тривалості процесу подрібнення ТЗП у відцентрових млинах, конструкції робочого органу і додаткової термічної обробки на структурність отриманого продукту, що оцінюється коефіцієнтом ДБФ [83]

Подрібнення продукту проводилося в лабораторному зразку відцентрового млина, схема якого представлена на рисунку 2.3, та включає: циліндричний корпус 1, кришку 2 і робочий орган 3 встановлений на валу 4. Під дією відцентрових сил подрібнюваний матеріал концентрується на периферії робочого органу. Тому, особлива увага приділялася конструкції периферійної частини робочого органу, яка виконує основну роботу з подрібнення. Експеримент проводився для трьох варіантів робочих органів з різною формою периферійної зони: *Z* – подібної форми (рисунок 2.3, *а*), *S* – подібної форми (рисунок 2.3, *б*) і двома робочими органами *S* – подібної форми (рисунок 2.3, *в*). Лінійна швидкість на периферії робочих органів складала близько 40 м/с [84].



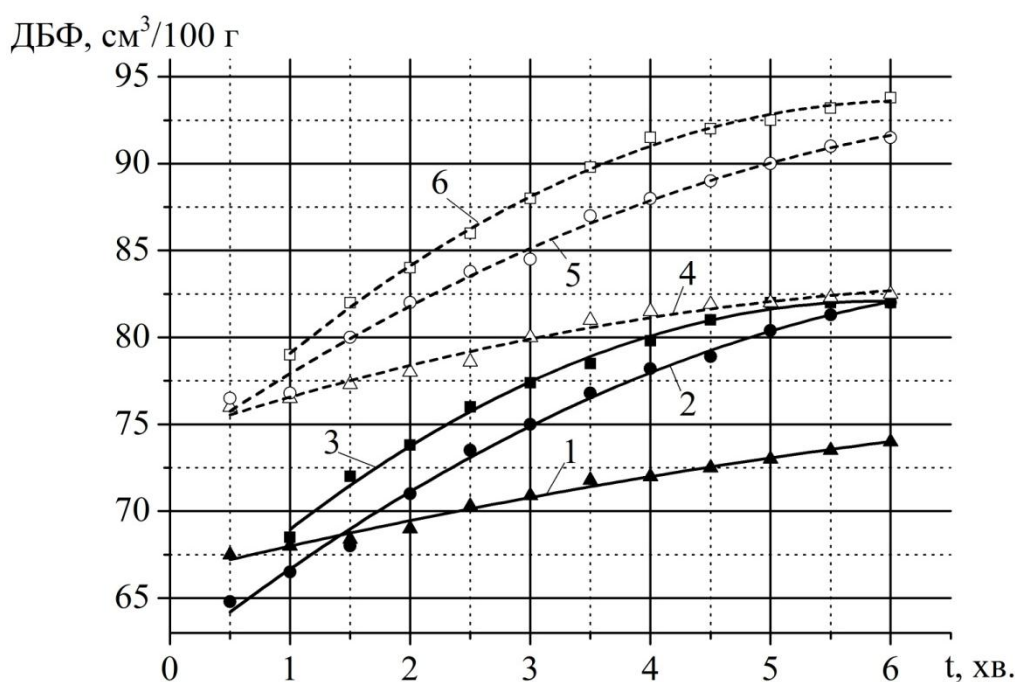
1 – помольна камера; 2 – кришка камери; 3 – робочий орган; 4 – вал

Рисунок 2.3 – Схема дослідних лабораторних установок

Для трьох варіантів робочих органів (рисунок 2.3, а, б, в) проводилася серія експериментів з різним часом обробки матеріалу, починаючи від 0,5 хв. до 6 хв. з кроком у пів хвилини. Для кожного зразку проводився аналіз структурності подрібненого матеріалу.

Після обробки подрібнений матеріал розділявся на дві частини. Перша використовувалася для аналізу адсорбції ДБФ, як показника структурності, а друга піддавалася термічній обробці на протязі 1 години при 600 °С, після чого так само піддавалася аналізу на структурність.

Основні результати дослідження кінетики процесу подрібнення твердих залишків піролізу зношених шин у відцентровому млині, а так само вплив додаткової термічної обробки наведені на рисунку 2.4, де показані результати аналізу показника структурності матеріалу залежно від тривалості процесу подрібнення для різних варіантів конструкції робочих органів.



1, 2, 3 - для робочих органів ((Рисунок 2.3 а, б, в) - відповідно; 4, 5, 6 - для тих же робочих органів після термічної обробки

Рисунок 2.4 – Залежність коефіцієнта ДБФ від часу подрібнення

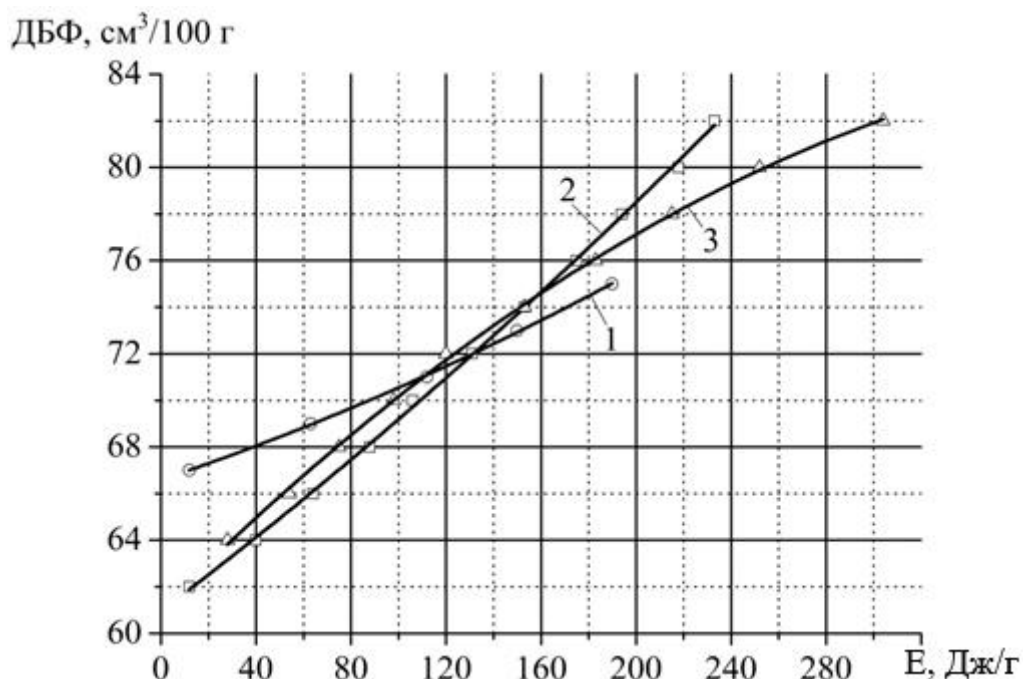
Аналіз експериментальних даних показує, що зі збільшенням тривалості обробки показник ДБФ подрібнюваного матеріалу підвищується. Так при

збільшенні часу обробки від 0,5 хв до 6 хв, показник ДБФ збільшився: для робочого органу Z – подібної форми (рисунок 2.3, а) на 10%; для робочого органу S – подібної форми (Рисунок 2.3, б) на 28%; для двох робочих органів S – подібної форми (Рисунок 2.3, в) на 26%. За однакового часу обробки матеріалу у відцентровому млині з різними робочими органами абсолютні значення ДБФ зростають для другого і третього варіантів робочих органів. Порівняння графіків залежностей (рисунок 2.4) показує, що інтенсивність подрібнення матеріалу підвищується при використанні робочих органів S – подібної та двох органів S – подібної форми. Так само, встановлено, що додаткова термічна обробка подрібненого матеріалу підвищує значення показника ДБФ: для робочого органу Z – подібної форми на 18,3%; S – подібної форми 15,3%; для двох робочих органів S – подібної форми на 20,2%.

Порівняльний аналіз енергетичних характеристик робочих органів (Рисунок 2.5) показав перевагу S – подібного робочого органу в порівнянні з Z – подібним. Так, при досягненні показника ДБФ $74 \text{ см}^3/100\text{г}$ різниця в питомих енерговитратах склала близько 15%, а при збільшенні часу подрібнення ця різниця істотно збільшиться. Очевидно, це обумовлено більшою витратою енергії на взаємодію робочого органу з матеріалом і меншою на подолання гідравлічного опору [85].

При цьому подрібнення двома S – подібними робочими органами дозволяє несуттєво підвищити структурність за рахунок більшої інтенсивності процесу подрібнення. Це можливо за умови знаходження другого робочого органу в зоні інтенсивної циркуляції матеріалу.

Слід зазначити, що зі збільшенням тривалості обробки швидкість збільшення коефіцієнта ДБФ знижується. Тому, існує максимальне значення ДБФ, яке можливо досягти під час подрібнення у запропонованому відцентровому млині. В умовах експерименту, максимальна величина коефіцієнта ДБФ отримана після обробки впродовж 6 хв і склала $82 \text{ см}^3/100\text{г}$. Додаткова термічна обробка дає можливість видалити летючі компоненти, що залишилися в ТЗП та підвищити показник адсорбції ДБФ до максимального значення $94 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ [86].



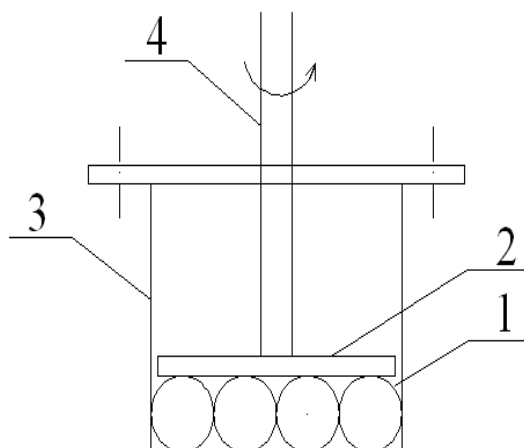
1,2,3, – для робочих органів, представлених на (Рисунок 2.3) а, б,
в – відповідно

Рисунок 2.5 – Вплив питомих енерговитрат на показник ДБФ

2.3 Подрібнення у кульовому кільцевому млині

Достатньо поширеними в практиці подрібнення матеріалів в гірничорудній та хімічній промисловості є кульові кільцеві млини [87-88], принцип дії котрих базується на стиранні та роздавлюванні подрібнюваного матеріалу. Подібний механізм подрібнення реалізований у дослідному лабораторному млині. Схема лабораторного млина представлена на рисунку 2.6. Принцип його дії заснований на передачі обертового моменту через вал 4 на диск 2 та кулі 1, котрі під дією обертового моменту починають рухатися, причому вони отримують як поступальний так і обертальний рух, і таким чином, реалізують механізм подрібнення роздавлювання та стирання. Інтенсивність руйнування матеріалу регулювалась притискним механізмом.

Результат визначення структурності матеріалу, а також питомих енерговитрат представлено на рисунках 2.7 та 2.8 відповідно [89]



1 – кулі; 2 – притискний диск; 3 – помольна камера; 4 – вал

Рисунок 2.6 – Схема лабораторного кульового кільцевого млина

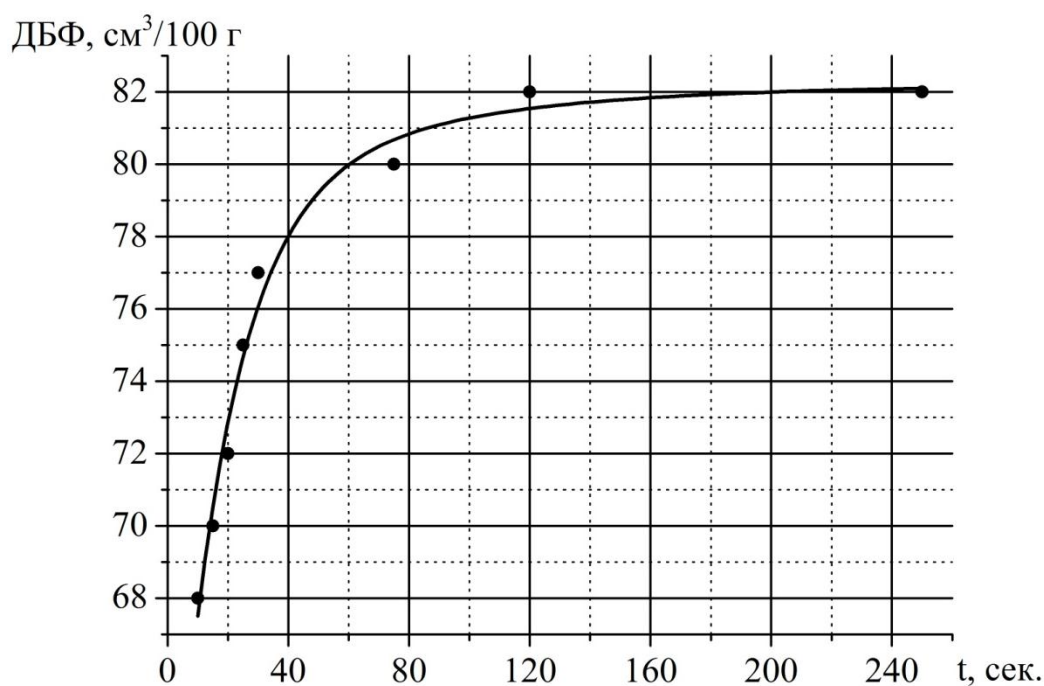


Рисунок 2.7 – Приріст структурності ТЗП при подрібненні в кульовому кільцевому млині

Як видно з рисунку 2.7 найбільша інтенсивність підвищення структурності матеріалу спостерігається в перші 30 с подрібнення, далі процес уповільнюється і повністю зупиняється після 150 с обробки матеріалу.

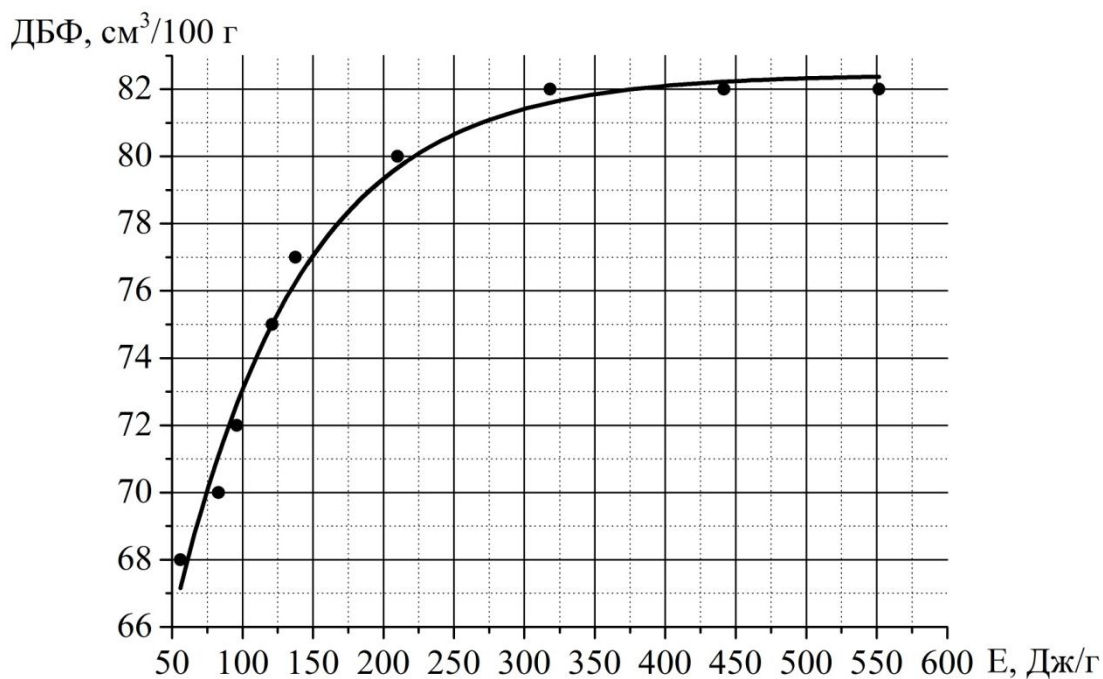


Рисунок 2.8 – Питомі енерговитрати процесу подрібнення в кульовому кільцевому млині

Питомі енерговитрати при досягненні коефіцієнта ДБФ 82 см³/100г склали 320 Дж/г, що видно на рисунку 2.8.

Таким чином, у кульовому кільцевому млині досягається максимальне значення показника структурності на рівні 82 см³/100 г, як і у відцентровому млині. При цьому питомі енерговитрати на 53% більші ніж у відцентровому млині.

2.4 Електрогідроімпульсне подрібнення ТЗП

Процес подрібнення здійснювався в експериментальній ЕГІ установці для тонкого і надтонкого подрібнення порошків твердих матеріалів. Основними параметрами лабораторної ЕГІ установки були: напруга розряду $U=35$ кВ, сумарна ємність конденсаторів $C=0,9$ мкФ. Енергія розрядного імпульсу розраховувалася за формулою [90]

$$W = \frac{U^2 C}{2}, \quad (2.2)$$

і склала 0,551 кДж. Технологічний вузол установки – вертикальна циліндрична розрядна камера об'ємом 1 л з нижнім розташуванням електродної системи з подвійним міжелектродним проміжком.

Методика експерименту полягала в наступному: у розрядній камері розміщувалася суспензія подрібнюваного матеріалу із співвідношенням ТЗП до води 1:10 по масі. Після обробки високоімпульсним електричним розрядом (ВІЕР) у кількості 10, 20, 30 і 50 імпульсів проводився відбір проб, сушка і аналіз гранулометричного складу згідно з методикою, викладеною в роботі [90].

Основні результати дослідження процесу надтонкого подрібнення твердих залишків розміром менше 40 мкм наведено в таблиці 2.1 і на рисунку 2.9. У таблиці 2.1 представлені результати аналізу гранулометричного складу матеріалу залежно від тривалості процесу подрібнення. На рисунку 2.9 приведена крива залежності відсоткового вмісту частинок класу – 1+0 мкм залежно від тривалості процесу подрібнення.

Представлені результати свідчать про те, що найбільша швидкість подрібнення має місце в перші десять імпульсів, що відповідає п'яти секундам подрібнення при частоті імпульсів $f=2$ Гц або одній секунді подрібнення при частоті імпульсів $f=10$ Гц, що є цілком реальним на сучасних ЕГІ установках.

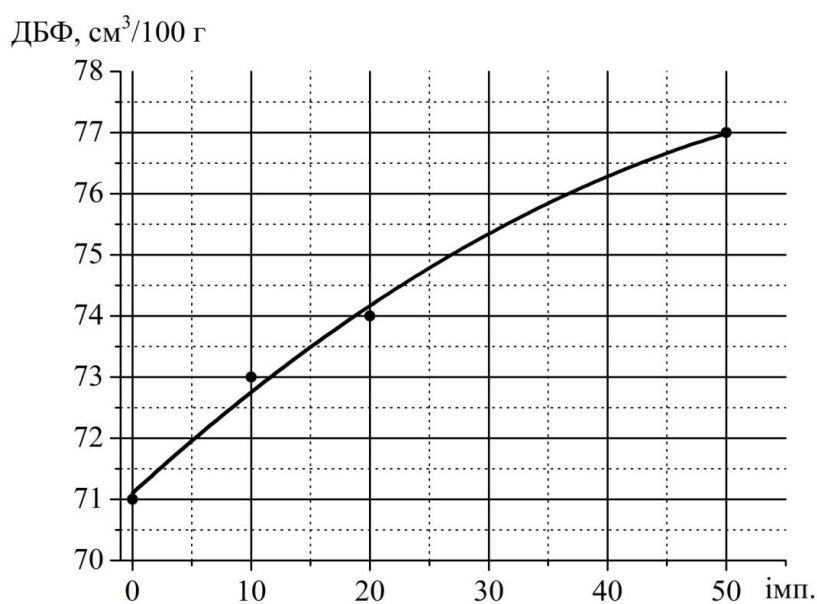


Рисунок 2.9 – Приріст структурності ТЗП при подрібненні в ЕГІ

Характеристики гранулометричного складу твердих залишків піролізу зношених шин залежно від тривалості ЕГІ подрібнення

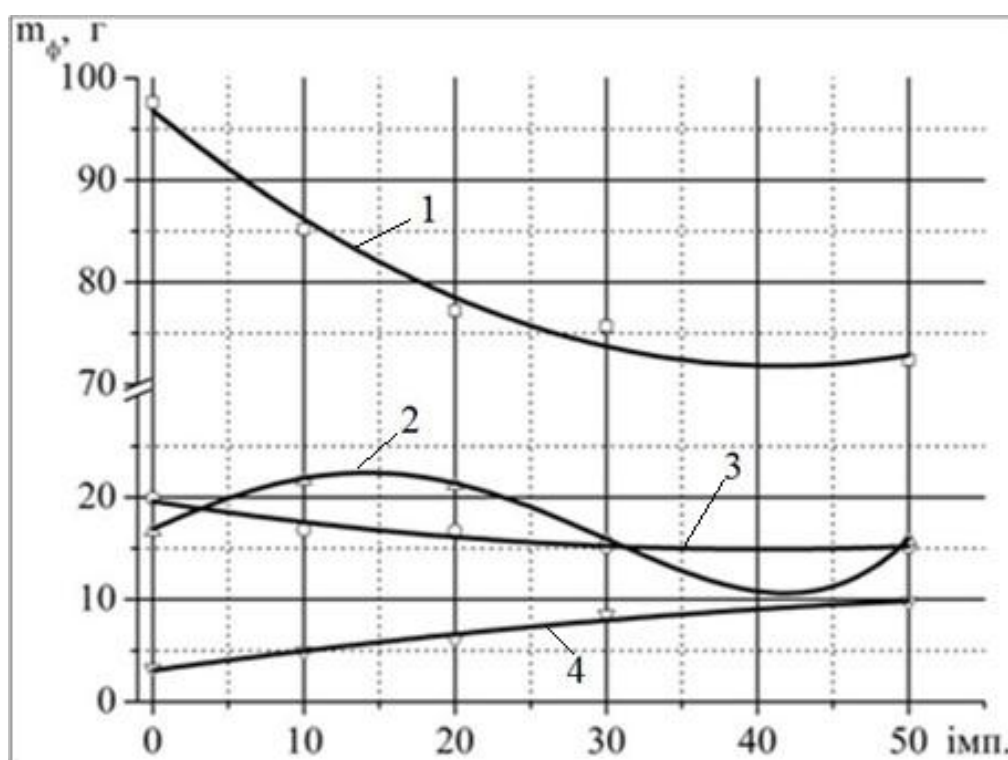
Тривалість подрібнення, імп.	Середній діаметр часток, мкм		Відсотковий вміст часток класу -- 1+0 мкм, %		Адсорбція ДБФ
	по кількості	по масі	по кількості	по масі	
0	3,65	14,27	72	1	71
10	2,10	7,70	86	3	-
20	2,34	7,21	89	4,5	-
50	1,88	6,91	95	7,6	77

Середня швидкість збільшення кількості частинок найдрібнішого класу - 1+0 мкм в цьому проміжку часу склала 0,2 г/імп. (1,44 кг/год). Далі швидкість знижується і в проміжках 20 - 30 і 30 - 50 імпульсів склала 0,15 г/імп. (1,08 кг/год) і 0,1 г/імп. (0,72 кг/год) відповідно. Приріст кількості частинок класу – 1+0 мкм при подрібненні під дією 50 ВІЕР (25 с при частоті дотримання імпульсів $f=2$ Гц) склав 23% по кількості часток і 6,6% по масі, що складає 6,6 гр.

Для встановлення впливу гранулометричного складу живлення установки на ефективність подрібнення проведені експериментальні дослідження процесу ЕГІ подрібнення твердих залишків піролізу зношених шин широкого діапазону крупності. Для імітації замкнутого циклу подрібнення з сепарацією після кожного етапу подрібнення найдрібніший клас - 40+0 мкм видалявся з розрядної камери. У таблиці 2.2 приведені результати аналізу гранулометричного складу частинок залежно від часу подрібнення. На рисунку 2.10 приведені криві кінетики подрібнення твердих часток для кожного класу крупності.

Характеристики гранулометричного складу твердих залишків піролізу зношених шин залежно від тривалості ЕГІ подрібнення

Тривалість подрібнення, імп.	Вага фракції, г				Середній діаметр частинок, мкм
	-- 200+110 мкм	-110+80 мкм	-- 80+40 мкм	-- 40+0 мкм	
0	97,60	19,90	16,70	3,20	128,7
10	85,20	16,80	21,70	4,90	123,9
20	77,20	16,70	21,20	6,10	120,4
30	75,70	15,16	15,76	8,50	119,4
50	72,40	15,16	15,76	9,75	118,9



1 - - 200+110 мкм; 2 - - 110+80 мкм; 3 - - 80+40 мкм; 4 - - 40+0 мкм

Рисунок 2.10 – Зміна маси часток твердого залишку піролізу зношених шин по фракціях залежно від тривалості подрібнення

2.5 Подрібнення в роторно-імпульсному апараті

Універсальні РІА зазвичай використовуються в малотоннажному виробництві з широким спектром номенклатури вироблюваного продукту та для вирішення дослідницьких завдань. У рамках даної роботи таким завданням є дослідження ефективності диспергування твердих залишків піролізу зношених автомобільних шин.

Для проведення дослідження створено лабораторний роторно-імпульсній апарат радіального типу з об'ємом камери 1 л. Структурна схема лабораторної роторно-імпульсної установки представлена на рисунку 2.11 а, а фотографія на рисунку 2.11 б [91]. Вихідним матеріалом для дослідження була суміш води та ТЗП у масовому співвідношенні 20 кг води та 1 кг ТЗП.

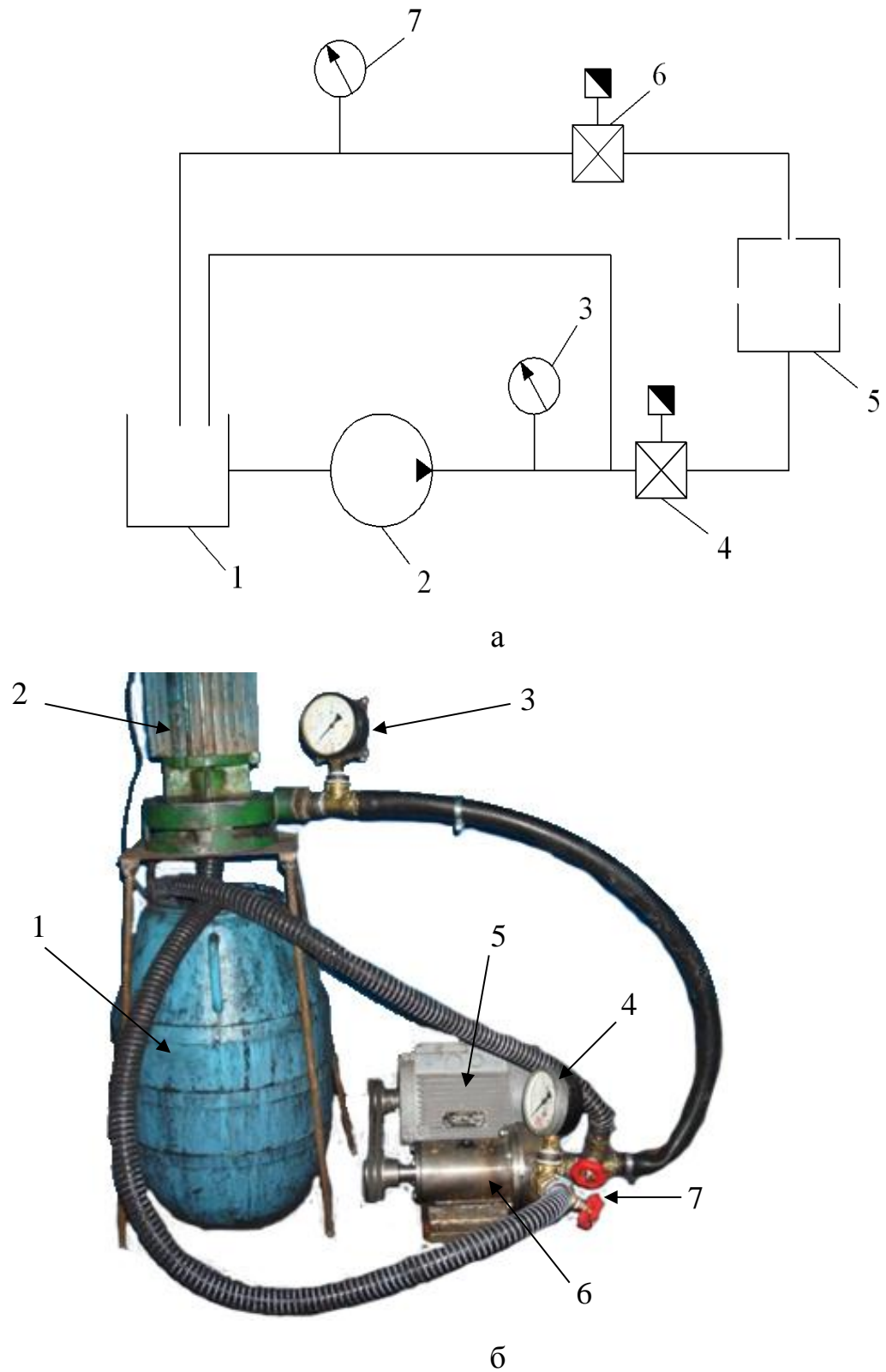
Попередньо ТЗП був механічно подрібнений у відцентровому млині до розмірів менших 100 мкм. Вихідний гранулометричний склад ТЗП у суміші визначений ситовими методами представлений у таблиця 2.3.

Вибір оптимального режиму роботи РІА виконувався з позиції визначення режиму, в якому процес кавітації буде найбільш інтенсивним. Підбір режиму виконувався за допомогою дроселів на вході та виході з РІА. Критерієм інтенсивності кавітації було обрано гучність та висота звукових коливань, що надходили з РІА. Відповідно до цього критерію обраний режим роботи, у якому перепад тиску на РІА складав 0,15 МПа, а продуктивність роботи по суміші складала $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

Таблиця 2.3

Гранулометричний склад вихідного ТЗП у суміші

Діапазони крупності	Масова частка, %	Маса, г
100-80 мкм	35,7	714
80-60 мкм	32,6	652
60-40 мкм	24,1	482
<40 мкм	7,6	152



1 – бак; 2 – відцентровий насос; 3, 4 – манометри; 5 – електродвигун;

б – роторно-імпульсний апарат; 7 – регулюючий дросель

Рисунок 2.11 – Лабораторна роторно-імпульсна установки

У лабораторних умовах був реалізований замкнутий цикл обробки суміші на протязі 16 хв., виходячи з продуктивності апарату можна зазначити, що матеріал котрий піддавався подрібненню пройшов 35 циклів обробки у РІА. Через кожні 2 хв. бралася проба суміші на виході з РІА, для аналізу структурності подрібненого матеріалу, попередньо проба фільтрувалась та збезводнювалась. Після 16 хв. обробки проводився аналіз гранулометричного складу оптичними методами, а саме аналізу на мікроскопі. Також відбиралося 150 г обробленого на РІА ТЗП для випробування його як наповнювача гумотехнічних виробів.

На рисунку 2.12 представлена залежність структурності від часу подрібнення ТЗП у РІА.

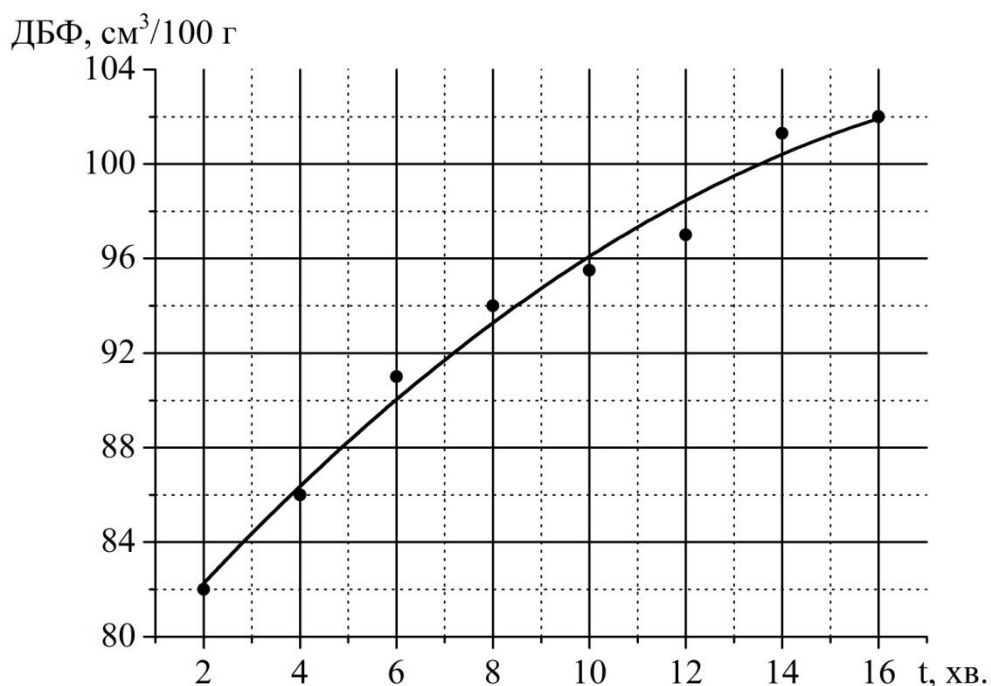


Рисунок 2.12 – Зміна ДБФ у часі при диспергуванні ТЗП у РІА

Аналіз графіку на рисунку 2.12 показує, що процес диспергування ТЗП відбувається на протязі всього часу обробки матеріалу. Досягнення показника ДБФ 103 см³/100г є досить суттєвим оскільки максимальне значення показника, яке вдавалося досягти механічними методами подрібнення, складає 82 см³/100г, а показник промислового ТУ 514 складає 115-125 см³/100г.

Аналіз подрібненого матеріалу на мікроскопі показав, що після обробки матеріалу в РІА кількість частинок розміром менше 60 мкм складає більше 93%, в

той час як у вихідному матеріалі кількість частинок менше 60 мкм складала лише 31,7 %. Фотографія одного зі зразків представлена на рисунку 2.13.

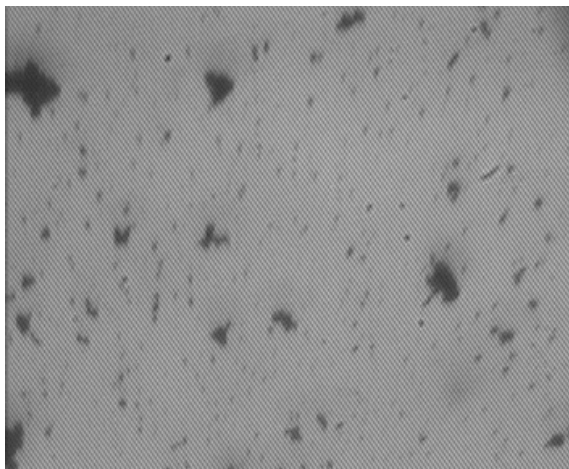


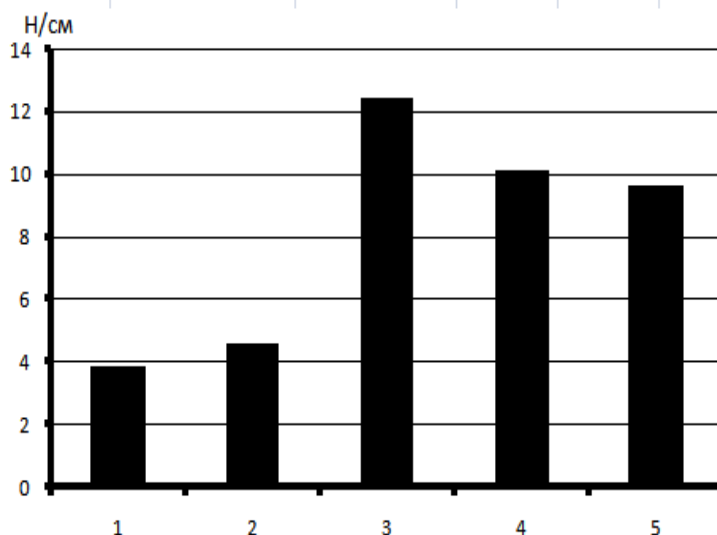
Рисунок 2.13 – Фотографія зразка подрібненого ГЗП у РІА

Основним напрямком застосування подрібненого твердого залишку піролізу, є його використання як наповнювача гумотехнічних виробів (ГТВ), з цього впливає доцільність перевірки ефективності використання твердих залишків піролізу як наповнювачів ГТВ.

У процесі обробки матеріалу в РІА спостерігався процес флотації, що проявлявся в утворенні статично стійкої піни на поверхні суспензії. Тому, було проведено дослідження на ефективність застосування як наповнювача ГТВ як утвореної піни, так і твердого залишку, що залишився в суспензії.

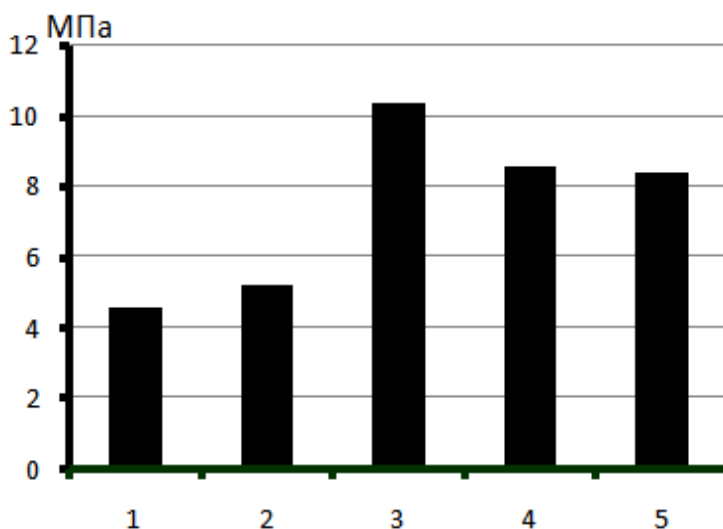
Випробування проводилися за нормальних умов, визначалися такі властивості гуми як: опір розриву, твердість, еластичність, опір роздеру, відносне подовження, умовне напруження при подовженні у 100%.

На рисунку 2.14 представлена діаграма міцності досліджуваних гум. На рисунку 2.16 представлена діаграма опору роздеру отриманих гум.



1 – без наповнювача; 2 – наповнювач крейда; 3 – наповнювач ТЗП з піни утвореної після обробки на РІА; 4 – наповнювач ТЗП з суспензії після обробки на РІА; 5 – вихідний матеріал

Рисунок 2.14 – Міцність досліджуваних гум



1 – без наповнювача; 2 – наповнювач крейда; 3 – наповнювач ТЗП з піни утвореної після обробки на РІА; 4 – наповнювач ТЗП з суспензії після обробки на РІА; 5 – вихідний матеріал

Рисунок 2.15 – Опір роздеру досліджуваних гум

Аналізуючи рисунки 2.14, 2.15 можна зробити висновок про ефективність диспергування твердого залишку піролізу в роторно-імпульсному апараті, оскільки властивості гуми отриманої з використанням як наповнювача продукту після

подрібнення в РІА, переважають властивості гуми виготовленої з використанням вихідного продукту. Як видно з рисунку 2.14 найкращі показники міцності досліджуваної гуми має ТЗП, котрий знаходився у піні після обробки на РІА, що може бути пояснено найбільшою дисперсністю цих частинок.

Найбільшим же опором до роздираючих впливів, серед гум з використанням ТЗП, має гума виготовлена з наповнювачем, що знаходився в суспензії після обробки в РІА, що може бути пояснено наявністю меншої кількості летучих компонентів в обробленому ТЗП. Виходячи з вищенаведеного, можна зробити висновок, що в залежності від вимог до властивостей гум ефективним буде використання ТЗП як із пін, так і з суспензії, що отримані після обробки на РІА.

2.6 Висновки

За результатами дослідження отримано:

– показано, що ЕГІ спосіб надтонкого подрібнення твердих залишків піролізу зношених автомобільних шин має величезні питомі енерговитрати 0,72 кДж/г, котрі майже у три рази перевищують енерговитрати у відцентровому млині;

– питомі енерговитрати у вертикальному кульовому млині складають 0,35 кДж/г, що перевищують аналогічний показник у відцентровому млині 0,26 кДж/г. Продуктивність при рівному об'ємі помольної камери у відцентрового млина вища порівняно з вертикальним кульовим млином;

– дослідження геометричної форми робочого органу показали найбільшу ефективність S-подібної форми периферійної зони порівняно з Z – подібною при подрібненні ТЗП;

– дослідження геометричної форми робочого органу в його периферійній зоні показали, що збільшення контактної площі елементів робочого органу в радіальній площині більш ефективне ніж у вертикальній біля стінок помольної камери;

– при аналізі структурності подрібненого твердого залишку піролізу у вищерозглянутих млинах, було виявлено, що після подрібнення у відцентровому млині та вертикальному кульовому млині максимального значення показник

структурності сягав 82 см³/100г, в ЕГІ установці лише 77 см³/100г, а у РІА 105 см³/100г;

– з аналізу властивостей досліджуваних модельних гум впливає основний недолік гідравлічних способів диспергування (таких як ЕГІ і РІА) твердого залишку піролізу зношених автомобільних шин, а саме підвищення зольності кінцевого продукту за рахунок солей металів, що знаходяться у воді і залишаються в продукті після її випаровування. Саме цим можна пояснити таке незначне підвищення показників модельних гум з використанням ТЗП обробленого в РІА в порівнянні з вихідним продуктом.

З аналізу усіх вищерозглянутих матеріалів, а також на основі аналізу конструкційної складності, можливостей реалізації механізмів неперервного вивантаження готової продукції було обрано відцентровий млин.

Перелік посилань

81. Виноградов, Б.В. Об измельчении твердых остатков пиролиза изношенных автомобильных шин электрогидроимпульсным способом / Б.В. Виноградов, Д.А. Федин, В.И. Емельяненко, **И.А. Осташко** // Вопросы химии и химической технологии. – 2008, № 6. – С. 163–166.
82. Виноградов, Б.В. Измельчение твердых остатков процесса пиролиза изношенных автомобильных шин в центробежной мельнице / Б.В. Виноградов, **И.А. Осташко**, В.И. Емельяненко // Вопросы химии и химической технологии №2 2009 С. 159-161.
83. Виноградов Б.В. Об энергетических характеристиках центробежных мельниц с S-образным рабочим органом / Б.В. Виноградов, **И.А. Осташко** // Вістник НТУ «ХПІ». – 2009. – № 25. – С. 64-69.
84. Виноградов, Б.В. Повышение эффективности применения твердого остатка пиролиза изношенных шин в качестве наполнителя эластомерных материалов. / Б.В. Виноградов, Ю.Н. Ващенко, **И.А. Осташко**, В.И. Емельяненко // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – №1. – С. 199-202.

85. Осташко, І.О. Аналіз міцності S-подібного робочого органу відцентрового млина / **І.О. Осташко** // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – №2. – С. 150-152.
86. Виноградов Б.В. Застосування роторно-імпульсного апарату для диспергування твердого залишку піролізу зношених автомобільних шин / Б.В. Виноградов, **И.А. Осташко** // Вістник НТУ «ХПІ». – 2010. – № 66. – С. 74-79.
87. Виноградов, Б.В. До питання утилізації зношених шин / Б.В. Виноградов, **І.О. Осташко**, Ю.Н. Ващенко, В.И. Емельяненко // Інформаційні технології, наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я тези доповіді XVIII міжнародна наук.-прак. конфер.: – Харків, 2010. – С. 206.
88. Пат. 91110 С Україна, МПК В02С 19/18. Пристрій для електрогідроімпульсного подрібнювання / Виноградов Б.В., Ємельяненко В.І. **Осташко І.О.**; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” - №а200810262; заявл. 11.08.2008; опубл. 25.06.2010; Бюл. №12.
89. Пат. 109467 С Україна, В02С 13/14. Відцентровий млин / Гірін О.Б., Виноградов Б. В., Ємельяненко В. І., **Осташко І. О.**; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” - № а201308263; заявл. 01.07.2013; опубл. 25.04.2014; Бюл. № 8.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

ВІДЦЕНТРОВОГО МЛИНА

3.1 Відцентровий млин, конструкція та принци роботи

Основним недоліком типової конструкції відцентрово-роторних млинів рисунок 1.6, як зазначалося раніше, є велика частина енергії, що витрачається на розгін рухомих елементів, котрі мають суттєву масу, а подрібнення матеріалу відбувається за рахунок ударного зіткнення матеріалу з відбійниками, що призводить до зайвого зростання питомих. Саме тому, було запропоновано нову конструкцію відцентрового млина рисунок 3.1 для подрібнення неабразивних сипких матеріалів, таких як твердий залишок піролізу зношених шин. Особливістю запропонованого млина є конструкція робочого органу та спосіб вивантаження матеріалу, який дає змогу суттєво знизити питомі енерговитрати на процес подрібнення, а також проводити сепарацію готового продукту.

Відцентровий ударний млин містить порожнистий вал 1 з робочим органом 2 S- подібної форми, периферійна частина якого створює бильний елемент 4, що закріплений на валу 1, котрий розташований у підшипниковому вузлі 3. До нижньої частини підшипникового вузла 3 прикріплений розвантажувальний пристрій 5, що виконано у формі відцентрового вентилятора з робочим колесом 6. Вихідний патрубок 7 розвантажувального пристрою 5 обладнаний засувкою 8. Передня стінка розвантажувальної камери 5 виконана у формі шайби 9, що утворює кільцевий зазор навколо порожнистого вала-ротора 1 та сполучає робоче колесо 6 з помольною камерою 10. Патрубок 11 завантажувального пристрою 12 розташований з зазором у порожнистому валу 1. Завантажувальний пристрій 12 кріпиться до підшипникового вузла 3 за допомогою кронштейна 13. У верхній частині порожнистого вала 1, між розвантажувальним пристроєм 12 і підшипниковим вузлом 3 встановлений шків 14, з'єднаний клиновим ременем 15 зі

шківом 16, який закріплений на валу електродвигуна 17. Підшипниковий вузол 3 та електродвигун 17 змонтовані на стійці 18 [90-94].

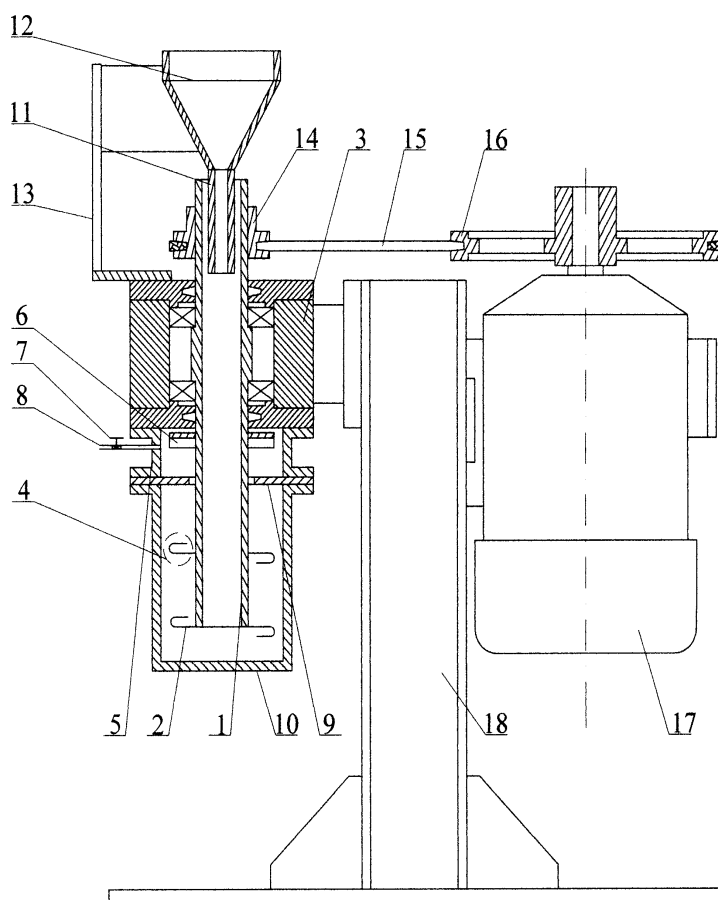


Рисунок 3.1 – Відцентровий млин ударної дії

Під час вмикання електродвигуна 17 порожнистий вал 1, через передачу, що складається із шківів 14 і 16 та клинових ременів, отримує обертальний рух разом з робочим колесом 6 та робочим органом ротора 2. Матеріал за допомогою завантажувального вузла 12 через патрубок 11 та порожнистий вал 1 надходить до помольної камери 10 і через кільцевий зазор шайби 6 за допомогою робочого колеса розвантажувального пристрою 5 подається до вихідного патрубку 7. Регулювання режиму роботи здійснюється за допомогою засувки 7. У разі зменшення продуктивності за допомогою засувки 7 час перебування матеріалу в помольній камері збільшується і відповідно крупність подрібненого матеріалу зменшується.

Таким чином, у зв'язку з відсутністю лопатей на робочих органах та малою їх поверхнею втрати на подолання гідродинамічних опорів будуть значно меншими порівняно з типовими конструкціями, а розташування кільцевого зазору та

розвантажувального пристрою над помольною камерою та робочим органом дасть змогу більш ефективно здійснювати сепарацію подрібненого матеріалу.

3.2 Обґрунтування раціональних параметрів робочого органу

3.2.1. Методика експерименту

Однією з актуальних задач під час проектування відцентрового млина є визначення раціональної форми його робочого органу, яка дає змогу за мінімальної металоємності обладнання та енерговитрат на процес подрібнення, отримати максимальну продуктивність за заданим класом.

Експеримент проводили на лабораторному відцентровому млині, фотографія якого представлено на рисунок 3.2. Під час дослідження вихідним матеріалом був вуглецевий ТЗП, з якого попередньо магнітним сепаратором було видалено всі залізні включення. Гранулометричний склад вихідного матеріалу наведено на рисунок 2.2.

Попередньо в помольну камеру об'ємом 21,2 л завантажувалося 3,5 кг ТЗП та проводили його подрібнення впродовж 1 хв з режимом, якому відповідає частота обертання робочого органу 381 рад/с, а лінійна швидкість на кінці робочого органу близько 57,5 м/с. Час подрібнення вимірювався секундоміром, а споживана потужність стрілочним ватметром у комплекті з трансформатором струму і записувалась на відео для подальшої обробки. Потім здрібнений матеріал проходив ситовий аналіз за допомогою лабораторного вібраційного розсіву та сит з пропускними розмірами 100, 80, 63, 40 мкм. У такій послідовності експеримент виконувався для різних конструкцій робочого органу. Для кожного експерименту аналіз гранулометричного складу подрібненого матеріалу виконувався по п'яти зразкам і вираховувалося середнє значення та середньоквадратичне відхилення з метою мінімізації випадкових помилок.



Рисунок 3.2 – Лабораторний відцентровий млин

3.2.2 Вплив форми периферійної зони робочого органу на ефективність подрібнення у відцентровому млині твердого залишку піролізу

Під дією відцентрових сил подрібнюваний матеріал концентрується на периферії робочого органу. Тому, особлива увага приділялася конструкції периферійної частини робочого органу, яка виконує основну роботу з подрібнення. Експеримент проводився для трьох варіантів робочих органів з різною конструкцією периферійної області: робочого органу S-подібної форми рисунок 2.3 а, робочого органу Z-подібної форми рисунок 2.3 б, і прямого робочого органу без додаткових елементів у периферійній зоні рисунок 2.3 в. Лінійна швидкість на периферії робочих органів складала близько 120 м/с.

Діаграми результатів аналізу гранулометричного складу матеріалу після подрібнення досліджуваними робочими органами представлено на рисунок 3.3.

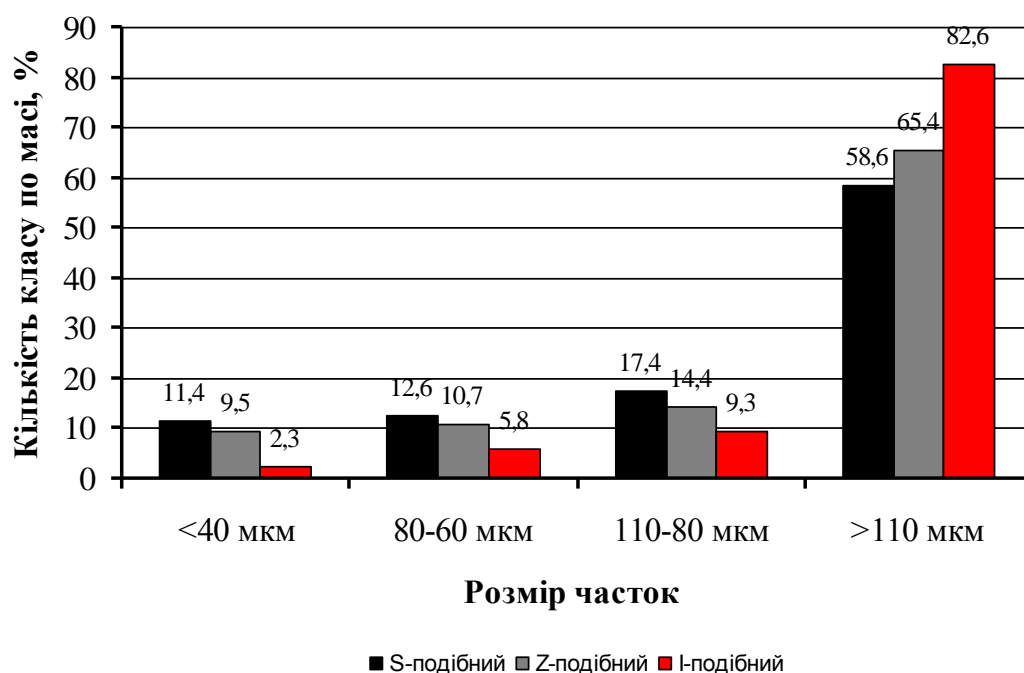


Рисунок 3.3 – Гранулометричний склад матеріалу після подрібнення для досліджуваних робочих органів

Як видно з результатів дослідження гранулометричного складу найкращі показники в робочого органу S-подібної форми, що може бути пояснено більшою площею цього органу в периферійній зоні (біля стінок помольної камери), де максимальна швидкість, а отже і сила удару між матеріалом і робочим органом. Питомі енерговитрати для досліджуваних робочих органів відрізнялись несуттєво, у стаціонарному режимі роботи млин споживав 1720 Вт під час роботи кожного з робочих органів.

Вищенаведені результати дозволили визначити, що раціональною геометричною формою робочого органу відцентрового млина є S – подібна, але не дана відповідь на питання, якою саме оптимальною величиною є розмір ділянки l_1 яка ефективно взаємодіє з матеріалом рисунок 3.4.

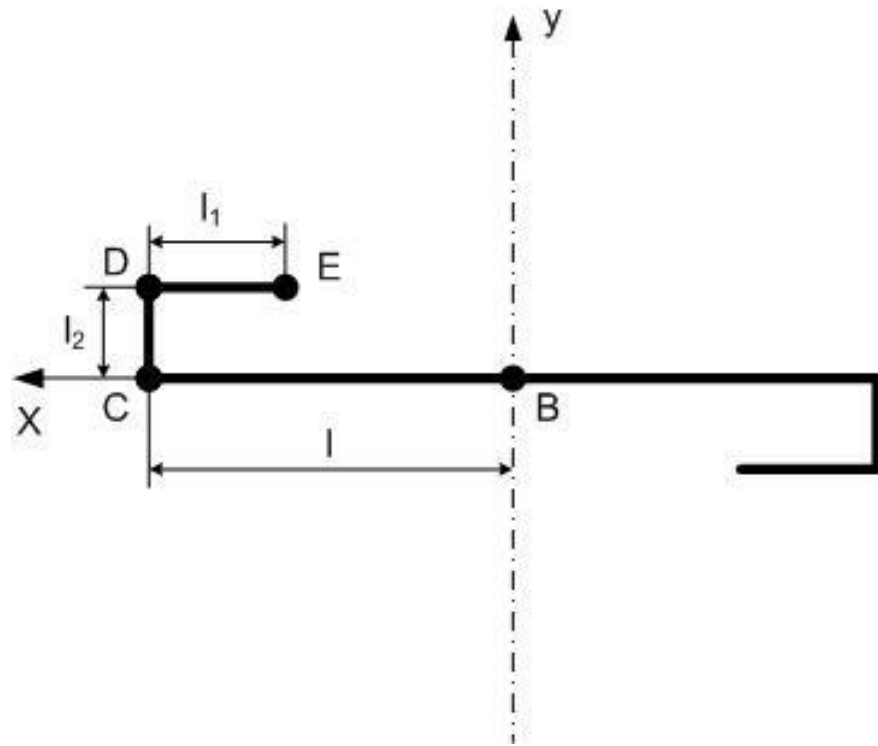


Рисунок 3.4 Ілюстрація ділянок S – подібного робочого органу

3.2.3 Обґрунтування геометричних параметрів робочого органу відцентрового млина

Важливим питанням є визначення впливу довжини загнутої ділянки S – подібного робочого органу, оскільки вона визначає довжину активної частини робочого органу і впливає на інтенсивність процесу подрібнення. Оскільки матеріал, що подрібнюється під дією відцентрових сил зосереджується на периферії робочого органу, де лінійні швидкості найбільші, то можна передбачити, що інтенсивність подрібнення матеріалу буде різною по довжині робочого органу. Виникає необхідність в обґрунтуванні раціональної довжини активної частини бильних елементів S – подібного робочого органу (рисунок 3.5) [95].

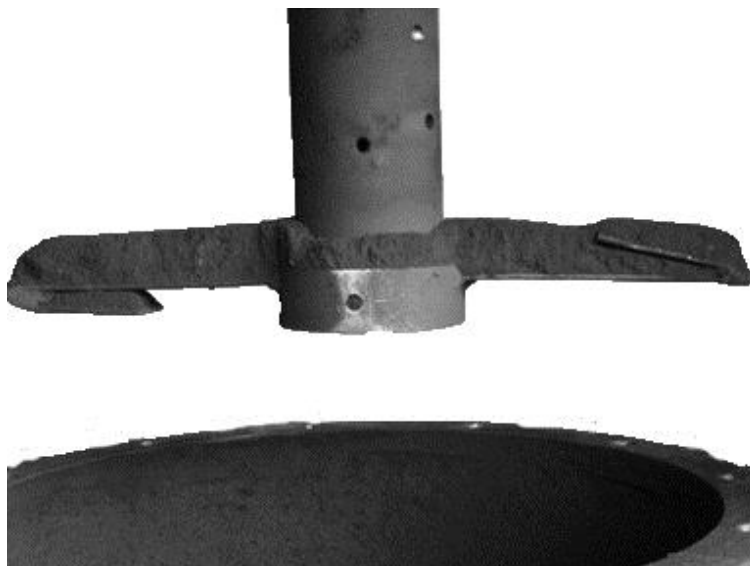


Рисунок 3.5 – S-подібний робочий орган, довжина ділянки $l_1 = 4$ см

Методика дослідження подібна до вищенаведеної і відрізняється тим, що змінним параметром виступає не відстань між бильними елементами h , а довжина ділянки l_1 робочого органу. Було проведено дослідження для довжин 0, 20, 40, 60, 80 мм ділянки l_1 робочого органу. Таким чином, даний експеримент дає можливість не лише визначити раціональну довжину ділянки l_1 S – подібного робочого органу, а й встановити область найбільш інтенсивного подрібнення матеріалу.

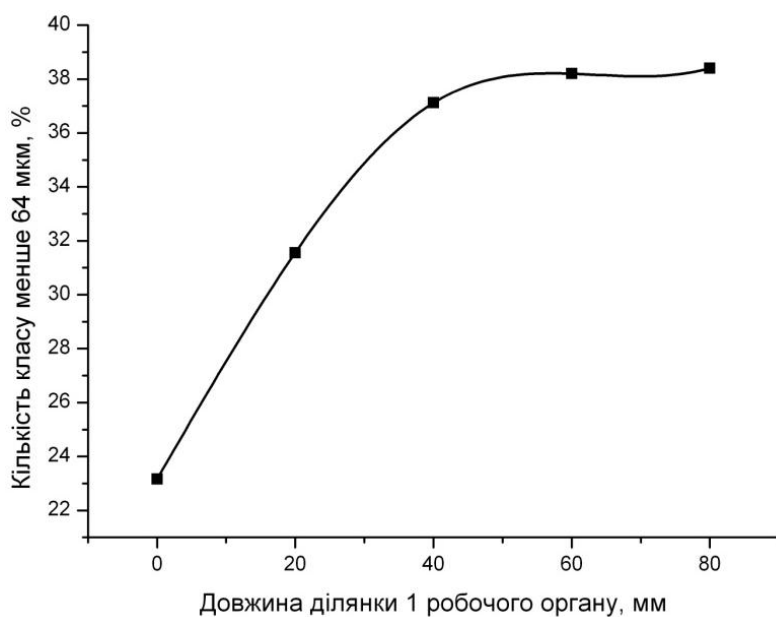


Рисунок 3.6 – Вплив довжини ділянки l_1 S – подібного робочого органу на інтенсивність утворення класу менше 64 мкм

З графіку видно, що основна маса матеріалу подрібнюється у периферійній зоні млина, яка за частоти обертання 3777 об./хв складає 15-25 % від радіусу робочого органу [96].

Діаграма результатів отриманого складу подрібненого матеріалу за різних довжин ділянки l_1 представлена на рисунку 3.7.

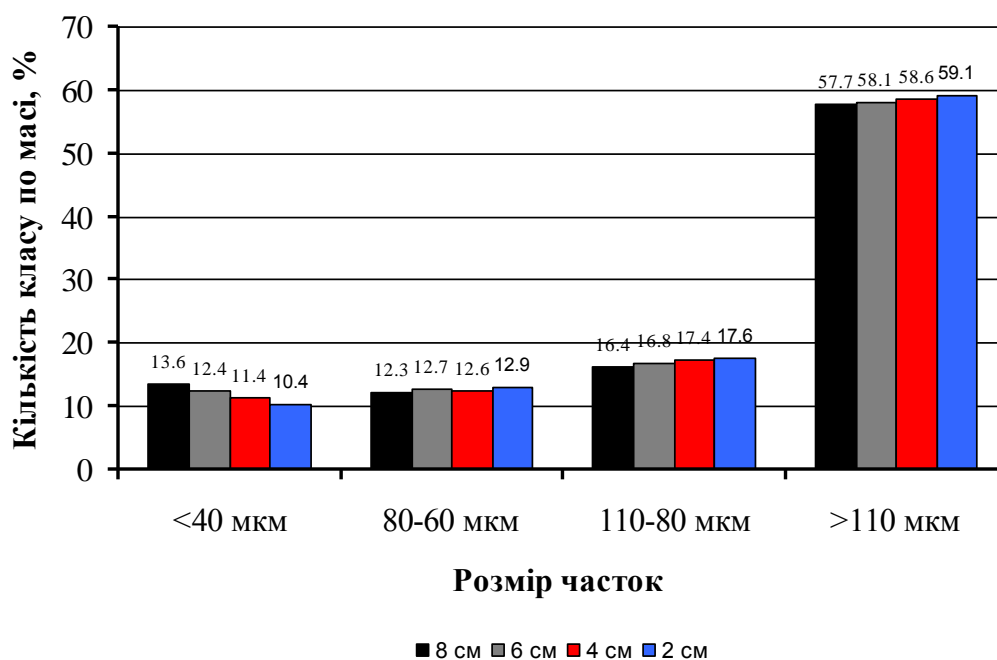


Рисунок 3.7 – Гранулометричний склад матеріалу після подрібнення у відцентровому млині при різних розмірах ділянки l_1

Важливим конструктивним параметром робочого органу є зазор між більшими елементами l_2 (рисунок 3.4). Для визначення раціональної величини l_2 було проведено ряд випробувань при значеннях зазору 2, 4, 6, 8 мм за методикою наведеною вище.

Графік залежності виходу класу менше 40 мкм від розміру зазору представлено на рисунку 3.8.

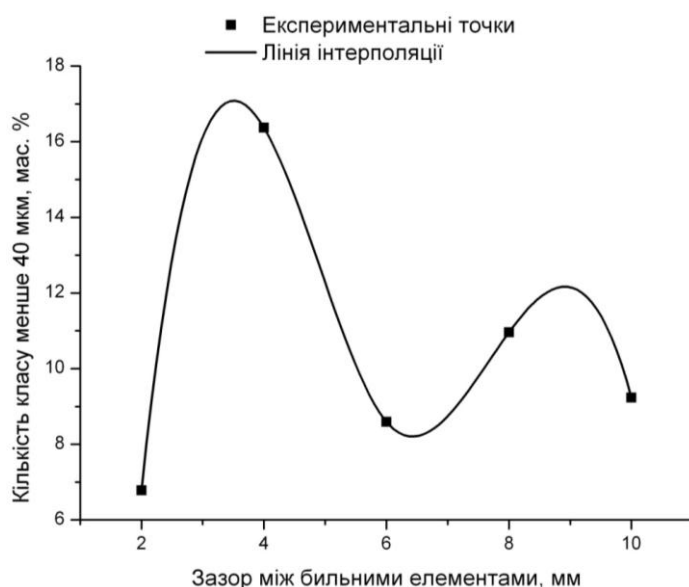


Рисунок 3.8 – Вплив відстані між бильними елементами на утворення класу менше 40 мкм.

Як видно з графіку при збільшенні зазору між бильними елементами від 2 до 4 мм спостерігається стрімке зростання кількості класу менше 40 мкм від 6,78 % до 16,37 %, при збільшенні зазору до 6 мм відбувається падіння до 8,59 %, подальше зростання зазору до 8 мм дає на виході 9,3 % класу менше 40 мкм. Отже, виходячи з позиції досягнення найбільшої інтенсивності надтонкого подрібнення раціональним є вибір зазору 4 мм між бильними елементами.

Потужність, що споживалася млином при сталому режимі роботи для різних значень зазору з врахуванням класу точності приладу була майже однаковою і склала 1,73 кВт. Але, оскільки кількість класу менше 40 мкм відрізняється, то і питомі енерговитрати будуть різні, що визначаються за формулою

$$E = \frac{P}{m} \cdot t$$

де E – питомі енерговитрати, кВтгод/тону;

P – потужність, що споживається млином, кВт;

m – маса класу менше 40 мкм, тон;

t – час, година.

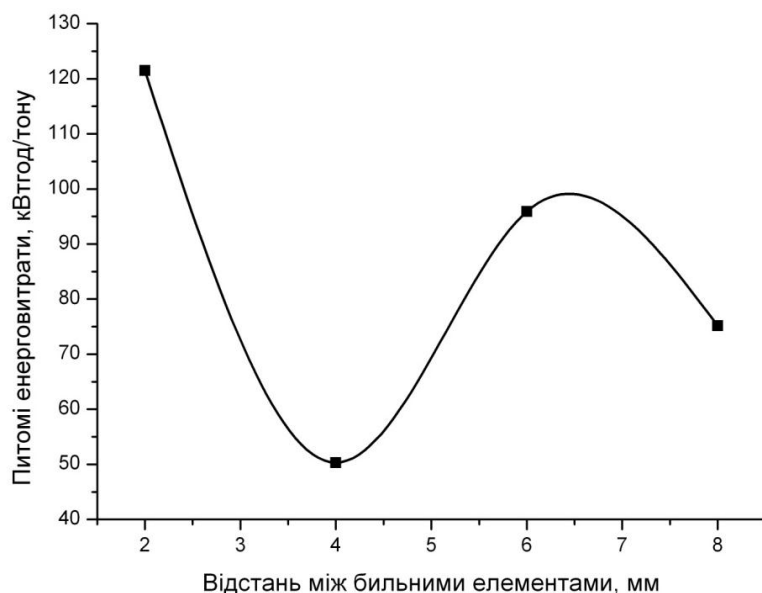


Рисунок 3.9 – Вплив зазору між бильними елементами на питомі енерговитрати процесу подрібнення

Як видно з графіку найменші питомі енерговитрати при висоті робочого органу 4 мм і складають 53 кВтгод/тону, при інших значеннях зазору питомі енерговитрати значно вищі.

Очевидно, що при збільшенні бильних елементів робочого органу збільшиться продуктивність млина. Але залишається невідомим вплив кількості бильних елементів на кінетику процесу та питомі енерговитрати на подрібнення. Крім того в ході експерименту було помічено налипання матеріалу між бильними елементами, що добре видно на рисунку 3.6. Тому, була розроблена нова конструкція робочого органу із з'єднувальною пластиною на периферії нахиленою під кутом 10 градусів до радіальної площини робочого органу, та додатковими двома робочими елементами, що охоплюють область інтенсивного подрібнення. Конструкція даного робочого органу представлена на рисунку 3.10.



Рисунок 3.10 – Досліджуваний робочий орган нової конструкції

За результатами випробувань робочих органів з одним і двома більними елементами отримано гранулометричний склад подрібненого твердого залишку піролізу, що представлено на графіку рисунок 3.11.

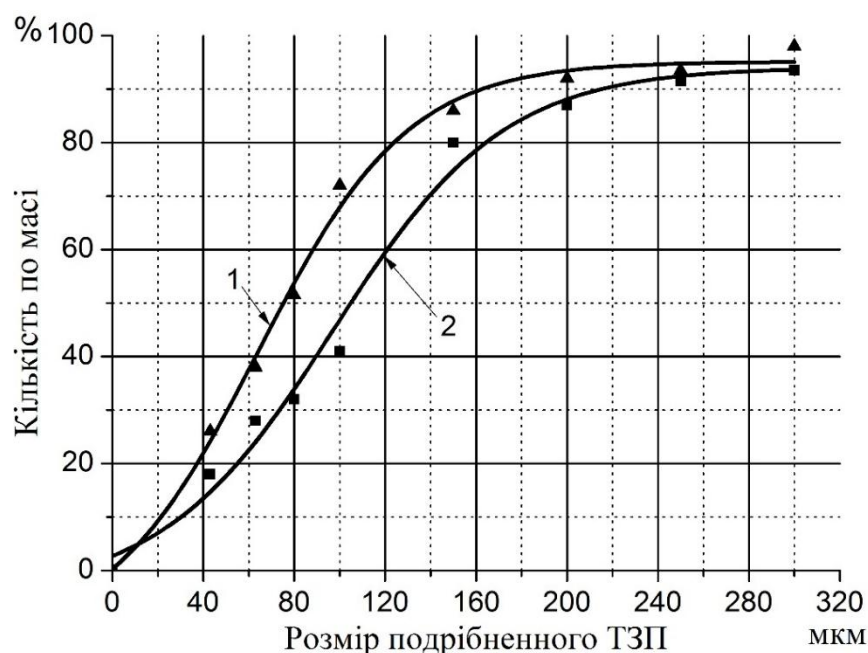


Рисунок 3.11 – Гранулометричний склад подрібненого ТЗП робочими органами з різною кількістю більних елементів: 1 – 4 більних елемента; 2 – 2 більних елемента

Аналіз гранулометричного складу подрібненого ТЗП рисунок 3.11 показує, що зі збільшенням кількості більних елементів збільшується продуктивність та споживана потужність і знижуються питомі енерговитрати. Крім того дослідження показали, що зміщення на 10 градусів пластини, котра з'єднує більні елементи дозволяє ліквідувати ефект налипання матеріалу на робочий орган.

Питомі енерговитрати на процес подрібнення до класу менше 40 мкм робочим органом з двома більними елементами склали 57 кВт·год/т, а робочого органу з чотирма більними елементами 21 кВт·год/тону. Отже у робочого органу з чотирма більними елементами питомі енерговитрати у 1,84 рази нижчі ніж у S – подібного робочого органу за однакового ступеню заповнення.

3.3 Визначення моменту на робочому органі при роботі в однорідному середовищі

Окремим випадком роботи в однорідному середовищі є обертання робочого органу в повітряному середовищі без завантаженні ТЗП.

Попередні лабораторні експерименти показали, що найбільш ефективна форма робочого органу, яка представлена на рисунку 3.10.

Для визначення навантажень на механічну систему млина та споживної потужності необхідно знайти закономірності зміни моменту, що діє на робочий орган залежно від його основних конструкційних та технологічних параметрів.

Надалі для простоти будемо розглядати лише одну з двох симетричних частин робочого органу, а сумарний момент опору для всього робочого органу буде в два рази більший. Кожна з частин симетрії складається з трьох ділянок BC, CD і DE відповідно довжиною l , l_1 , l_2 . Момент опору M_o , що діє на робочий орган, включає такі складові: момент сил опору тертю $M_{o.t.}$, що є дотичною, та моменту сил тиску по нормалі $M_{тиску}$:

$$M_o = M_{o.t.} + M_{тиску} . \quad (3.1)$$

Момент сил опору тертю і момент сил тиску в сумі представляють момент сили лобового опору, що визначається за наступною формулою (3.2):

$$M_{л.о.} = x_o \cdot F_{л.о.} , \quad (3.2)$$

де $F_{л.о.}$ – сила лобового опору (Н); x_o – відстань від осі обертання до точки прикладання рівнодійної сили лобового опору (м).

Розглянемо випадок, коли млин працює в ненавантаженому режимі, тобто, подрібнюваний матеріал у млин не подається. Тоді, на робочий орган впливає лише повітря, що знаходиться в млині. При цьому, у стаціонарному режимі роботи кутова швидкість потоку повітря рівна ω_n , а кутова швидкість ротора ω_p . Сила опору повітряного потоку обертання робочого органу залежить від відносної

кутової швидкості ω_{vid} , яка є різницею між кутовою швидкістю ротора і кутовою швидкістю повітряного потоку.

$$\omega_{vid} = \omega_p - \omega_{п}, \quad (3.3)$$

де ω_{vid} – відносна кутова швидкість (рад/с).

Надалі відносна кутова швидкість буде представлена у вигляді:

$$\omega = k \cdot \omega_p, \quad (3.4)$$

де $k < 1$ – коефіцієнт, що враховує реальний рух повітря відносно робочого органу.

Сила лобового опору визначається за відомим законом [97]

$$dF_{л.о.} = \xi \cdot \frac{\rho V^2}{2} dS, \quad (3.5)$$

де ξ – коефіцієнт лобового опору середовища; ρ – щільність середовища (кг/м³); V – окружна швидкість (м/с); S – площа торцевої частини (м²).

Виділимо елементарну ділянку робочого органу dx , тоді для нього буде справедливий вираз

$$dS = b \cdot dx, \quad (3.6)$$

де b – товщина торця робочого органу (м).

Окружна швидкість визначається за формулою:

$$V = \omega \cdot x, \quad (3.7)$$

де x – відстань від осі обертання до ділянки dx .

Тоді враховуючи (3.4), (3.5) (3.6) і (3.7), визначимо сили, що діють на елементарну ділянку робочого органу:

$$dF_{л.о.} = \xi \cdot b \cdot k \frac{\rho \cdot \omega_p^2 \cdot x^2}{2} dx. \quad (3.8)$$

$$x_1 = \frac{\int_0^l f(x) \cdot x dx}{\int_0^l f(x) dx} \quad (3.11)$$

де $f(x)$ – функція, що описує криву залежності сили лобового опору від відстані до осі обертання (рисунок 3.13).

Після підстановки (3.9) в (3.11) отримуємо вираз

$$x_1 = \frac{\frac{1}{2} \xi \cdot b \cdot k \cdot \rho \cdot \omega_p^2 \cdot \int_0^l x^2 \cdot x \cdot dx}{\frac{1}{2} \xi \cdot b \cdot k \cdot \rho \cdot \omega_p^2 \cdot \int_0^l x^2 dx} \quad (3.12)$$

Провівши інтегрування виразу (3.12) по x отримуємо координату точки прикладання рівнодійної системи паралельних сил лобового опору для ділянки ВС (3.13).

$$x_1 = \frac{\frac{1}{2} \xi \cdot b \cdot k \cdot \rho \cdot \omega_p^2 \cdot \frac{x^4}{4}}{\frac{1}{2} \xi \cdot b \cdot k \cdot \rho \cdot \omega_p^2 \cdot \frac{x^3}{3}} = \frac{3}{4} l \quad (3.13)$$

Розглянемо ділянку CD (Рисунок 3.13), що розташована в площині паралельній осі обертання. Площина ділянки CD робочого органу та сила $F_{л.о.(2)}$ визначаються за формулами:

$$S = b \cdot l_2, \quad (3.14)$$

$$F_{л.о.(2)} = \frac{1}{2} \cdot \xi_1 \cdot \rho \cdot S \cdot \omega^2 \cdot l^2 \quad (3.15)$$

Рівнодійна сили лобового опору, що діє на ділянку CD прикладена посередині ділянки і має координату:

$$x_2 = l. \quad (3.16)$$

Розглянемо ділянку DE. Епюра швидкостей і сил лобового опору, для ділянки DE представлена на рисунку 3.13.

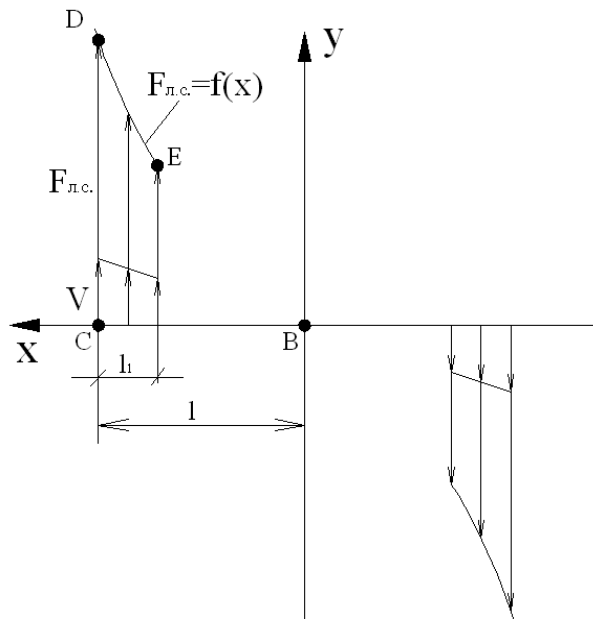


Рисунок 3.13 – Епюра розподілу колової швидкості і сили лобового опору по довжині робочого органу (ділянка DE)

Рівнодійна системи паралельних сил, що діє на ділянку DE визначається за формулою

$$F_{\text{л.о.}(3)} = \frac{1}{2} \xi \cdot b \cdot \rho \cdot \omega^2 \int_{(l-l_1)}^l x^2 dx. \quad (3.17)$$

Проінтегрувавши вираз (3.17), отримуємо формулу для визначення рівнодійної сили лобового опору ділянки DE у вигляді:

$$F_{\text{л.о.}(3)} = \frac{1}{2} \xi \cdot b \cdot \rho \cdot \omega^2 \left(\frac{l^3}{3} - \frac{(l-l_1)^3}{3} \right). \quad (3.18)$$

Координата x_3 прикладення рівнодійної сили опору для ділянки DE, з врахуванням виразу (3.11) можна визначити за формулою

$$x_3 = \frac{\frac{1}{2} \xi \cdot b \cdot \rho \cdot \omega^2 \int_{(l-l_1)}^l x^3 dx}{\frac{1}{2} \xi \cdot b \cdot \rho \cdot \omega^2 \int_{(l-l_1)}^l x^2 dx} = \frac{3 l^4 - (l-l_1)^4}{4 l^3 - (l-l_1)^3} \quad (3.19)$$

Підставляючи значення $F_{л.о.(1)}$, $F_{л.о.(2)}$, $F_{л.о.(3)}$ та x_1 , x_2 , x_3 в (3.2), дістанемо формулу для визначення сумарного моменту лобового опору в однорідному середовищі для досліджуваного робочого органу у вигляді:

$$M_{л.о.} = 2 \cdot \xi \cdot \rho_c \cdot A_0 \cdot \omega_{від}^2 \quad (3.20)$$

де A_0 дорівнює

$$A_0 = b \cdot \left(\frac{1}{8} l^4 + \frac{1}{2} l_2 \cdot l^3 + \frac{1}{4} \cdot (l^4 - (l-l_1)^4) \right) \quad (3.21)$$

3.4 Експериментальне визначення моменту на робочому органі

3.4.1 Методика визначення споживаної потужності

Основним фактором, що визначає продуктивність млина, питомі енерговитрати та споживану потужність є частота обертання робочого органу. Тому, актуальною задачею є визначення впливу частоти обертання робочого органу рисунок 3.14 на споживану потужність млина з метою перевірки достовірності залежностей (3.1)–(3.10) та визначення значень коефіцієнта лобового опору для робочого органу заданої геометричної форми.



Рисунок 3.14 – Конструкція робочого органу з 4-ма більними елементами

Споживана потужність для робочого органу даного профілю може бути визначена за формулою:

$$N = \xi \cdot \rho_c \cdot A_0 \cdot \omega_{\text{від}}^x, \quad (3.21)$$

- де ρ_c – щільність середовища, у якому обертається робочий орган (кг/м³);
 ξ – коефіцієнт лобового опору, (залежить від профілю);
 A_0 – геометричні параметри робочого органу;
 $\omega_{\text{від}}$ – кутова швидкість робочого органу відносно потоку матеріалу;
 x – ступінь залежності потужності від кутової швидкості.

Для визначення споживаної потужності використано цифровий осцилограф, який вимірював та перетворював у цифровий код напругу і струм, що надходили з мережі на млин. Таким чином, отримавши графіки миттєвих значень напруги і струму (рисунок 3.15) та перемноживши їх було отримано криву зміни миттєвих значень потужності, проінтегрувавши яку отримали значення споживаної потужності.

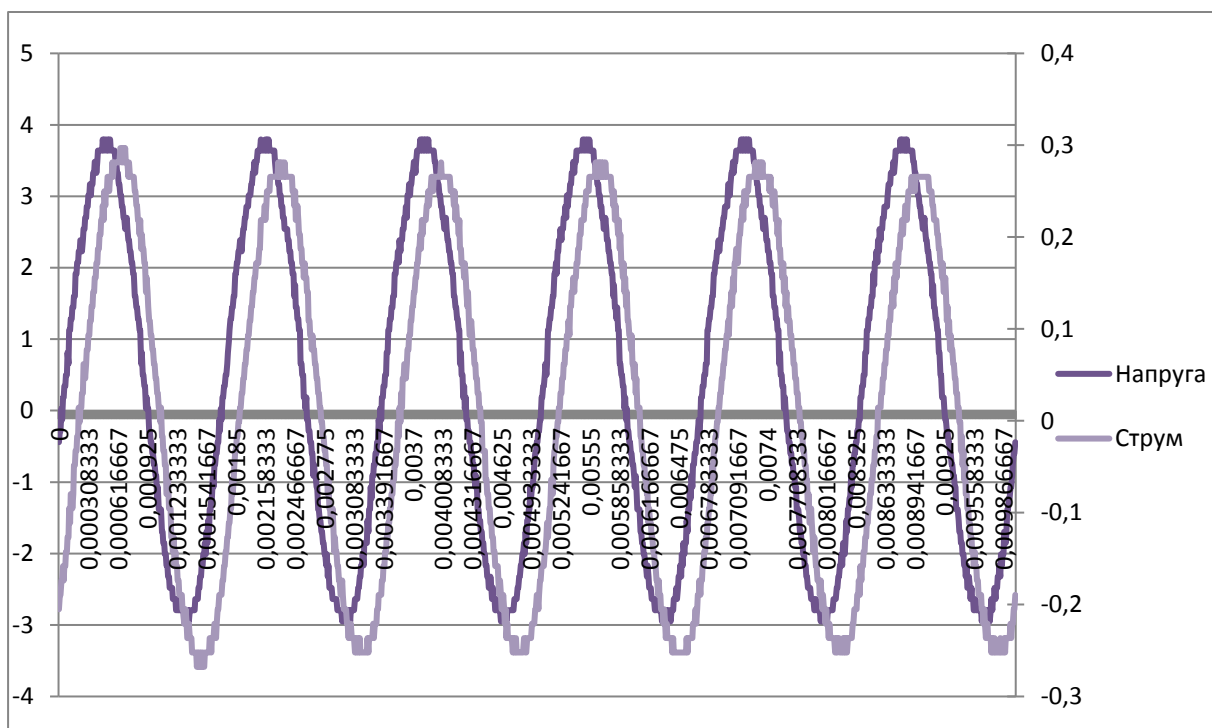


Рисунок 3.15 – Криві струму та напруги, що отримані з осцилографу

3.4.2 Експериментальне визначення коефіцієнту лобового опору

Невідомими у рівнянні (3.21) є значення відносної кутової швидкості та коефіцієнту лобового опору. Для їх визначення проведемо випробування робочого органу при його роботі без матеріалу (на повітрі) та визначимо споживану потужність при частотах обертання 997, 1312, 2929, 3777 об./хв. Оскільки необхідно визначити два параметра з одного рівняння, то зробимо припущення, що при обертанні робочого органу при знятій помольній камері дисипація енергії призводить до того, що частота обертання повітряних мас навколо робочого органу становить не більше 10 % від частоти обертання ротора двигуна. Таким чином провівши обробку системи рівнянь (3.22) отримаємо значення відносної кутової швидкості та коефіцієнту лобового опору

$$\begin{aligned} N_1 &= \xi \cdot \rho_c \cdot A_0 \cdot (k_1 \cdot \omega_p)^3, \\ N_2 &= \xi \cdot \rho_c \cdot A_0 \cdot (k_2 \cdot \omega_p)^3, \end{aligned} \quad (3.22)$$

де N_1 , N_2 , k_1 , k_2 – потужність та коефіцієнт ковзання, що споживаються при знятій та встановленій помольній камері відповідно; $\rho_{\text{пов}}$ – щільність повітря (1,2 кг/м³) A – геометричні параметри робочого органу; $\omega_{1\text{від}}$ – кутова швидкість робочого органу відносно маси повітря при роботі без помольної камери; $\omega_{2\text{від}}$ – кутова швидкість робочого органу відносно маси повітря при роботі в помольній камері.

Таким чином з першого рівняння (3.22) у разі припущення, що відносна кутова швидкість становить 0,9 від кутової швидкості ротора млина знаходимо коефіцієнт лобового опору, що дорівнює 12,6. З другого рівняння системи (3.22), підставивши значення коефіцієнту лобового опору, отримуємо значення відносної кутової швидкості.

Для кожної частоти обертання проводили серію замірів споживаної потужності при роботі: лише трансмісії млина; трансмісії і робочого органу на повітрі без помольної камери; у реальному режимі за відсутності завантаження.

Таким чином, було отримано криві зміни споживаної потужності при заданих частотах обертання робочого органу (рисунок 3.16).

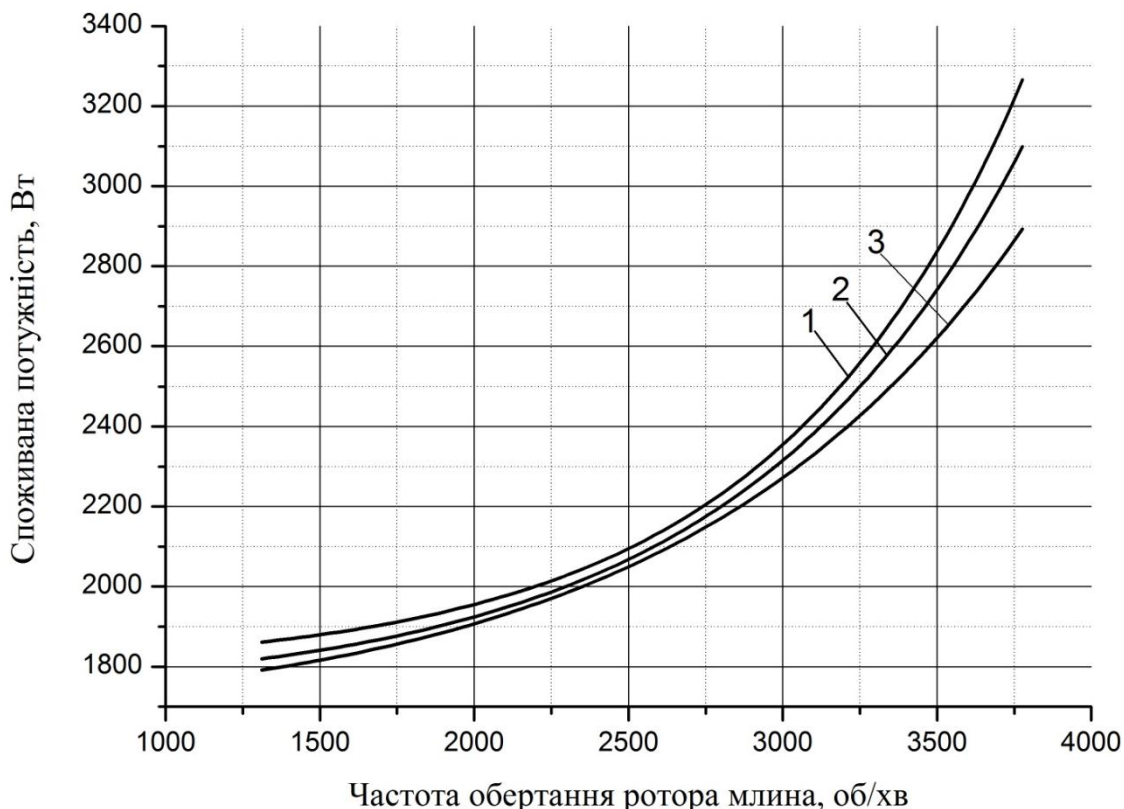


Рисунок 3.16 – Криві зміни споживаної потужності від частоти обертання: 1 – при знятій помольній камері; 2 – в помольній камері; 3 – без робочого органу

Отримані результати показують, що з підвищенням частоти обертання зростає споживана потужність трансмісії по експоненціальній залежності. При цьому енергоспоживання робочого органу при підвищенні частоти обертання також зростає по експоненціальній залежності, що наочно представлено на рисунку 3.17.

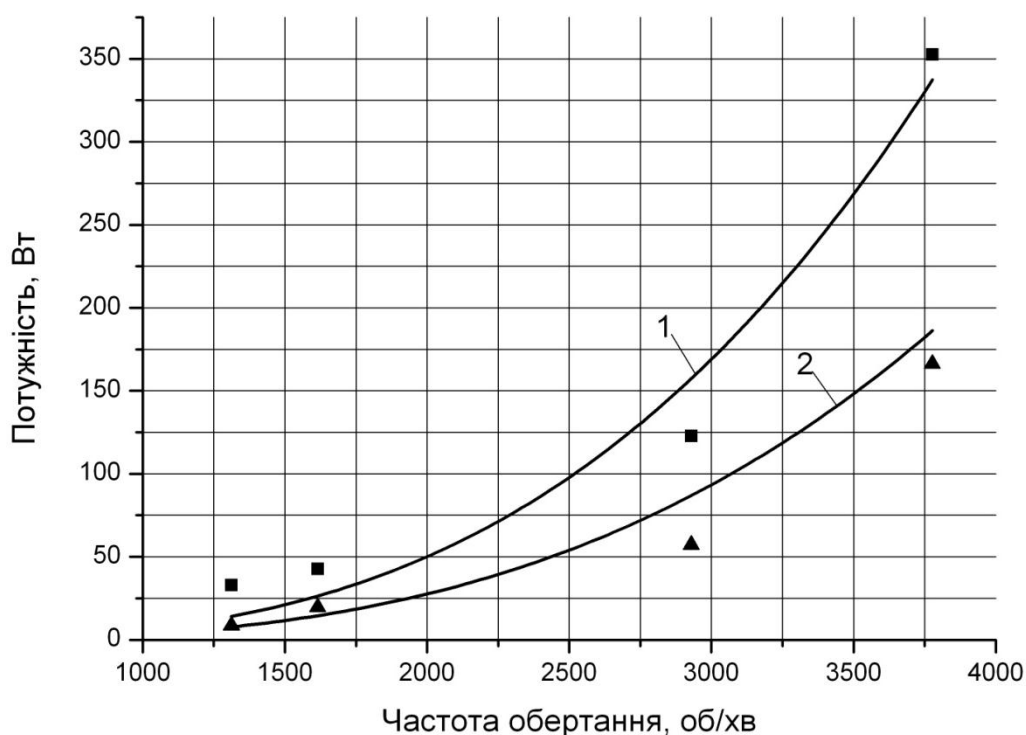


Рисунок 3.17 – Залежність споживаної потужності від частоти обертання робочого органу: 1 – без помольної камери; 2 – в помольній камері

Отримані результати показують, що з підвищенням частоти обертання робочого органу пропорційно підвищується частота обертання повітряної маси навколо робочого органу. Таким чином, можна зробити висновок, що кутова швидкість робочого органу відносно потоку подрібнюваної суміші в діапазоні частот (997-3777 об./хв) змінюється в третьому ступені від кутової швидкості.

3.4.2 Експериментальне визначення відносної кутової швидкості

Для визначення відносної кутової швидкості було використано чашковий анемометр. За допомогою анемометра було визначено швидкість повітряного потоку навколо робочого органу при його обертанні на різних частотах.

У результаті експерименту було визначено, що при роботі без камери, повітря обертається з кутовою швидкістю, яка становить 8,1 % від кутової швидкості ротора млина, а коефіцієнт $\xi = 12,6$ для даної конструкції робочого

органу. Кутова швидкість повітряного потоку залежно від частоти обертання робочого органу представлена на рисунку 3.18.

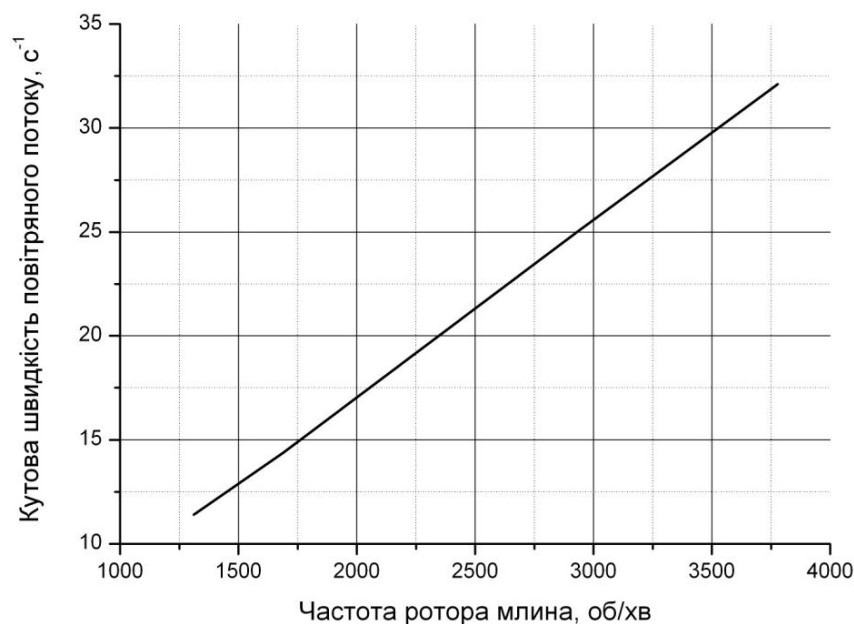


Рисунок 3.18 – Кутова швидкість повітряного потоку

Аналіз експериментальних даних показує, що кутова швидкість повітря лінійно залежить від кутової швидкості робочого органу, а залежність споживаної потужності робочим органом при порожній камері відповідає рівнянню (3.22), тобто споживана потужність залежить від частоти обертання робочого органу в третьому ступені.

Таким чином знайдені значення коефіцієнту лобового опору ξ та відносної кутової швидкості. Величину $k_1 \cdot \omega_p$ приймемо незмінною при роботі помольної камери як з матеріалом, так і без нього. Для перевірки цього припущення провели випробування з вимірювання споживаної потужності в процесі подрібнення.

3.4.3 Споживання потужності під час подрібнення

У процесі подрібнення матеріал нерівномірно розподіляється в об'ємі помольної камери, під дією відцентрових сил він концентрується біля її стінок, а отже це вносить додаткові зміни в розподілі сил опору. Тому, необхідно провести дослідження залежності споживаної потужності від частоти обертання робочого

органу під час процесу подрібнення, тобто при завантаженні твердого залишку піролізу.

Під час випробування було завантажено 3,5 кг твердого залишку піролізу, насипна щільність якого складала 445 кг/м^3 , вимірювання споживаної потужності проводились при частотах обертання (1312, 1692, 2929, 3777), результати представлені на рисунку 3.19.

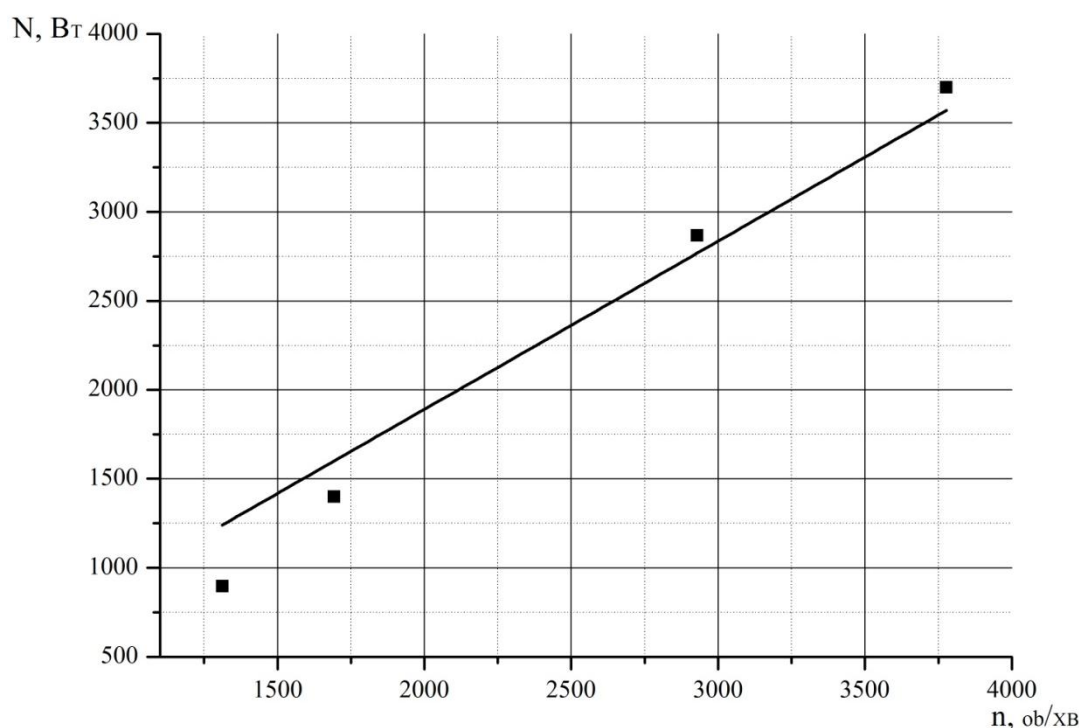


Рисунок 3.19 – Залежність споживаної потужності від частоти обертання робочого органу під час подрібнення

На відміну від порожньої камери, коли середовищем є повітря, у разі завантаження помольної камери споживана потужність лінійно залежить від частоти обертання робочого органу (рисунок 3.191). Це можна пояснити тим, що в процесі подрібнення матеріал, під дією відцентрових сил, нерівномірно розподіляється в об'ємі помольної камери, і концентрується біля її стінок. У результаті зменшується активна ділянка робочого органу, що вносить додаткові зміни в розподіл сил опору. На підставі співставлення рівняння (3.21) і експериментальних даних (рисунок 3.19) можна дійти висновку, що залежність

параметра, який характеризує розміри активної ділянки робочого органу від частоти обертання має вигляд:

$$A(\omega) = A_0 \cdot \nu \cdot \omega_p^{-2}, \quad (3.23)$$

де $\nu = 1,72$ коефіцієнт, що враховує зменшення активної ділянки робочого органу.

Отже, формула для визначення споживаної потужності на процес подрібнення у відцентровому млині має вигляд

$$N = \xi \cdot \rho_c \cdot A_0 \cdot \nu \cdot (k_2 \cdot \omega_p). \quad (3.24)$$

Дана формула справедлива за умови, що середній діаметр частинок матеріалу складає 43 мкм. На рисунку 3.20 надана експериментальна залежність споживаної потужності від середнього діаметру частинок матеріалу. Збільшення споживаної потужності зі збільшенням середнього діаметру можна пояснити тим, що збільшується відносна кутова швидкість.

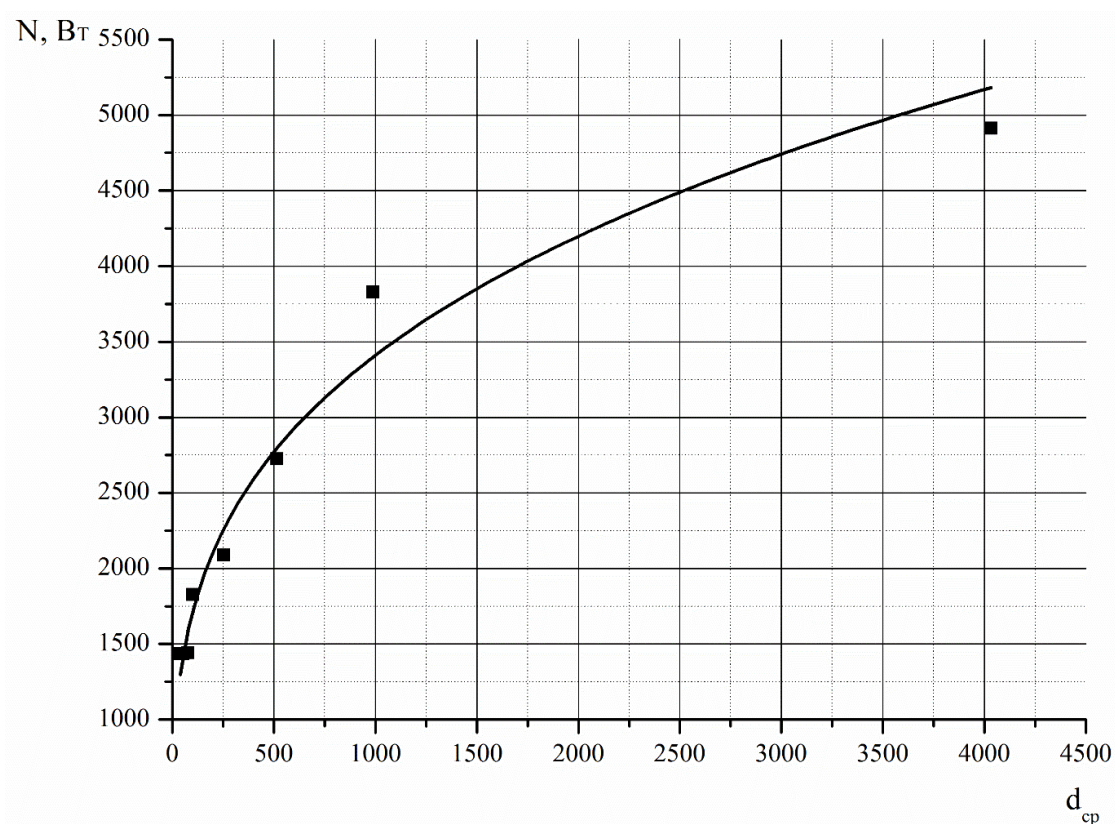


Рисунок 3.20 – Залежності зміни енергоспоживання від середнього діаметра частинок при кутовій швидкості 389 с^{-1}

Тому, у формулу для визначення потужності (3.24) необхідно ввести коефіцієнт k_3 , що враховує середній діаметр подрібнюваного матеріалу в помольній камері.

$$N = \xi \cdot \rho_c \cdot A_0 \cdot v \cdot (k_2 \cdot \omega_p) \cdot k_3 \quad (3.25)$$

Експериментальну залежність споживаної потужності від середнього діаметру частинок у помольній камері (рисунок 3.22) можна апроксимувати з дисперсією $R=0,97$, наступною функцією

$$N(d_{cp}) = 429.3 \cdot d_{cp}^{0.3} \quad (3.26)$$

З умови рівності споживаних потужностей визначених за формулами (3.25) та (3.26) отримуємо

$$k_3 = 2.03 \cdot d_{cp}^{0.3} \quad (3.27)$$

Таким чином, остаточна формула для визначення споживаної потужності на процес подрібнення відцентровим млином при подрібненні твердого залишку піролізу має вигляд

$$N = 2.31 \cdot \xi \cdot \rho_c \cdot d_{cp}^{0.3} \cdot A_0 \cdot \omega_p \quad (3.28)$$

3.5 Розрахунок потужності млина

3.5.1 Неперервний процес подрібнення

Під час неперервного процесу подрібнення відбувається одночасне завантаження вихідного продукту та вивантаження готового класу. Попередні дослідження показали, що оптимальний ступінь заповнення помольної камери матеріалом складає 0,25-0,35 від об'єму. Тому, при неперервному процесі подрібнення доцільним є підтримка заданого ступеня заповнення камери, що

керується рівномірним завантаженням та вивантаженням матеріалу. В цьому випадку на продуктивність млина по заданому класу впливає частота обертання робочого органу і середній діаметр матеріалу у помольній камері. Таким чином при постійній частоті обертання і продуктивності середній діаметр частинок матеріалу у помольній камері залишається незмінним, а отже постійним залишається момент опору млина. Тому, для визначення споживаної потужності при неперервному процесі подрібнення доцільним є використання формули

$$N_{непер} = \frac{N}{\eta}, \quad (3.29)$$

де η – коефіцієнт корисної дії трансмісії млина (складає 0,7 – 0,9).

3.5.2 Циклічний режим роботи

У циклічному режимі роботи навантаження на двигун млина має змінний характер, і змінюється не лише при закінченні кожного циклу, а й у період подрібнення матеріалу. Характер зміни навантаження за період подрібнення визначається кривою зміни моментів опору (що залежить від середнього діаметру подрібнюваного матеріалу), або враховуючи пропорційність кривою сили струму електродвигуна.

Попередні дослідження показали, що процес інтенсивного подрібнення відбувається в інтервалі часу від 0,5 до 6 хв. в залежності від ступеня завантаження помольної камери. Тому доцільним є вибір часу одного циклу подрібнення в межах 6 хв.

На протязі циклу подрібнення момент опору змінюється від свого максимального значення до номінального при цьому середній діаметр частинок у помольній камері досягає значення 43 мкм. Оскільки пуск двигуна проходить за декілька секунд, то із самого початку можна взяти максимальне значення моменту опору рисунок 3.21. У подальшому момент опору не змінюється і залишається постійним, що наглядно представлено на рисунку 3.21.

Залежність початкового максимального M_{max} від ступеня заповнення камери має вигляд:

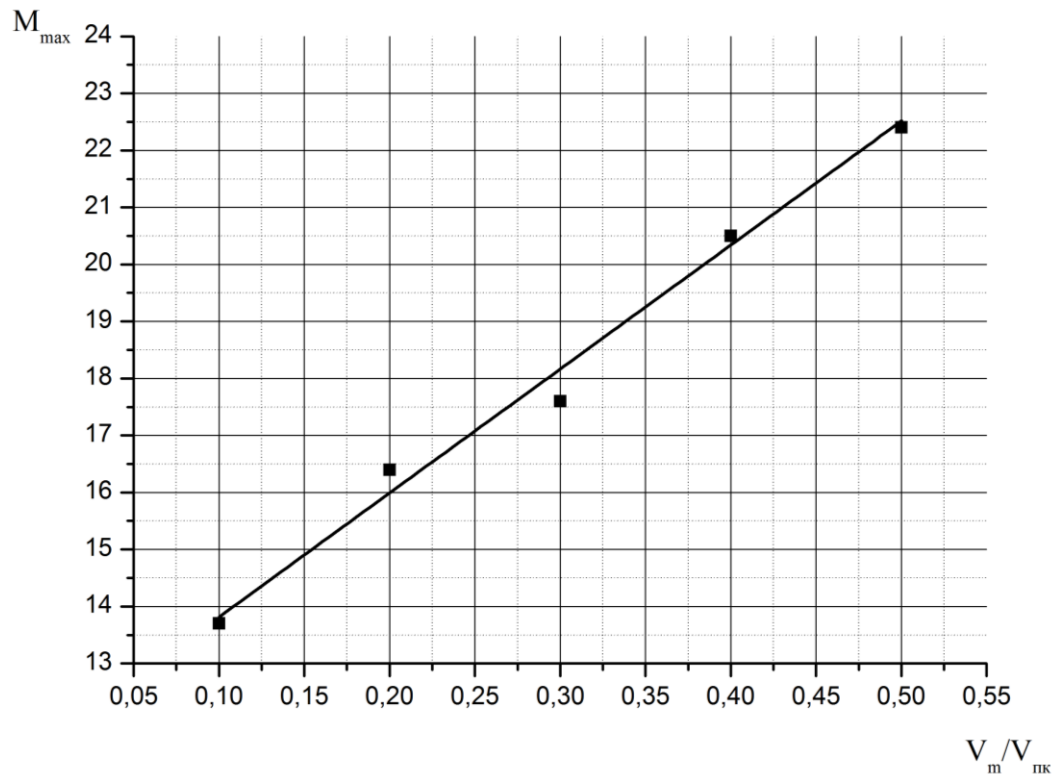


Рисунок 3.21 – Залежність зміни максимального моменту від ступеня заповнення помольної камери

Крива, що описує експериментальні данні з урахуванням запасу по потужності можна замінити на дві прямі, що описують еквівалентний момент.

Для визначення потужності двигуна з умови нагріву його обмоток до допустимої температури необхідно змінний режим роботи навантаження двигуна привести до умов еквівалентних по нагріву режиму з неперервним постійним навантаженням. Таким чином залежність моменту опору у часі в циклічному режимі можна представити виразом

$$M(t) = M_{max} - \frac{M_{max} - M_{уст}}{t_1} \cdot t \quad (3.30)$$

Виходячи з пропорційності між силою струму на двигуні та утвореним ним обертовим моментом отримаємо:

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{\int_0^T M(t)^2 dt}{T_{екв}}} \quad (3.31)$$

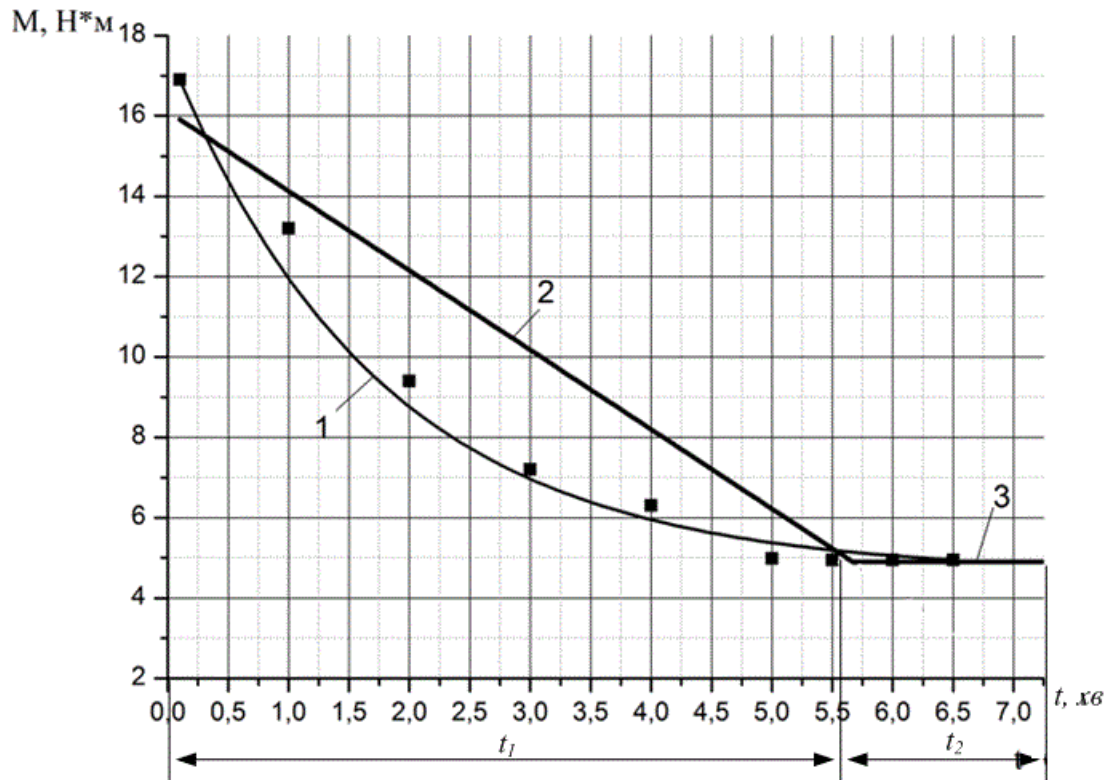


Рисунок 3.22 – Залежність зміни моменту опору під час циклічного процесу подрібнення ТЗП при частоті 3777 об./хв: 1 – крива котрою апроксимовані експериментальні данні; 2 – пряма еквівалентного моменту опору; 3 – пряма що відповідає значенню моменту при закінченні циклу подрібнення (середній діаметр часток 43 мкм)

В нашому конкретному випадку еквівалентний момент описується виразом (3.32)

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{\int_0^T (M_{max} - \frac{M_{max} - M_{уст}}{t_1} \cdot t)^2 dt + M_{уст}^2 \cdot (T - t_1)}{T}}, \quad (3.32)$$

де M_{max} – максимальне значення моменту опору (відповідає моменту на початку процесу подрібнення); $M_{уст}$ – усталене значення моменту (Н·м); t_1 – час за який момент зменшується пряма 2; T – період подрібнення (хв).

У кінцевому вигляді формула для визначення еквівалентного моменту має вигляд (3.33)

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{(M_{\text{max}}^2 + M_{\text{max}} \cdot M_{\text{уст}} + M_{\text{уст}}^2) \cdot \frac{t_1}{3} + M_{\text{уст}}^2 \cdot (T - t_1)}{T}}. \quad (3.33)$$

Еквівалентна потужність з умови нагріву визначається за формулою

$$N_{\text{екв}} = M_{\text{екв}} \cdot \omega_{\text{ном}} \quad (3.34)$$

Кінцевий вираз для визначення потужності двигуна при циклічному процесі подрібнення виходячи з умов нагріву обмотки має вигляд

$$N_{\text{цикл}} = \frac{1}{\eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{елек}}} \cdot M_{\text{екв}} \cdot \omega_{\text{ном}} \quad (3.35)$$

де $\eta_{\text{мех}}$ – КПД механічної передачі; $\eta_{\text{елек}}$ – КПД електричної передачі.

3.6 Дослідження напруженого стану робочого органу

Запропонований відцентровий млин відноситься до класу швидкохідних млинів, оскільки швидкість на кінцях робочого органу досягає 100 м/с, де саме виникають найбільші контактні напруження, що можуть призвести до деформації чи виходу з ладу робочого органу. Тому, виникає задача розробки методики розрахунку робочого органу на міцність при роботі [99].

Попередні лабораторні дослідження показали, що під час роботи у розімкненому робочому органі під дією сили інерції виникає згинальний момент $M_{\text{зг}}$, що при деяких співвідношеннях геометричних параметрів, та кутової швидкості може призвести до деформації периферійної зони. За результатами попередніх лабораторних досліджень визначено, що критичним перерізом, в якому під дією згинального моменту виникає найбільше напруження, є переріз АА (рисунок 3.4). Згинальний момент у перерізі АА визначається за формулою

$$M_{32} = F_1^{in} \cdot \Delta_1 + F_2^{in} \cdot \Delta_2, \quad (3.36)$$

де F_1^{in} – сила інерції, що діє на елемент 1 робочого органу (Н);

F_2^{in} – сила інерції, що діє на елемент 2 робочого органу (Н);

$\Delta_1=h$ – відстань (плече) від точки прикладання сили F_1^{in} до критичного перерізу (м);

$\Delta_2=h/2$ – відстань (плече) від точки прикладання сили F_2^{in} до критичного перерізу (м).

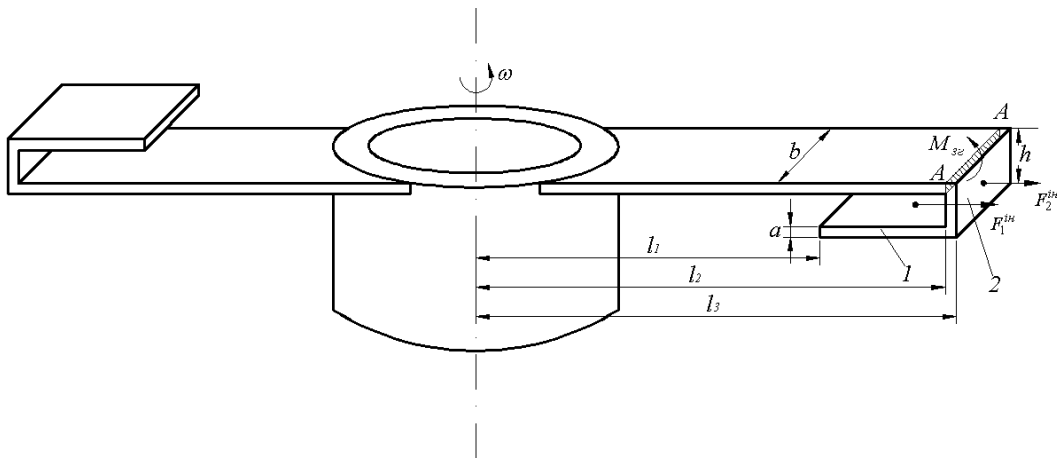


Рисунок 3.23 – Просторове зображення S-подібного робочого органу

Для визначення сил F_1^{in} та F_2^{in} розглянемо відокремлено елемент 1 та елемент 2 робочого органу. Загальна формула для визначення сил інерції відповідно має вигляд

$$F^{in} = m \cdot r \cdot \omega^2, \quad (3.37)$$

де m – маса елемента (кг);

r – відстань від центру мас до осі обертання (м);

ω – кутова швидкість (рад/с).

При $\omega = \text{const}$ отримуємо формули для визначення сил інерції елементів 1 і 2 робочого органу відповідно:

$$F_1^{in} = \omega^2 \cdot \rho \cdot a \cdot b \cdot \frac{l_2^2 - l_1^2}{2}, \quad (3.38)$$

$$F_2^{in} = \omega^2 \cdot \rho \cdot a \cdot b \cdot \frac{l_3 + l_2}{2} \cdot h. \quad (3.39)$$

де ρ – щільність матеріалу, з якого виготовлений робочий орган (кг/м³);

a та b – геометричні розміри робочого органу (м).

Напруження σ в критичному перерізі АА, що утворене згинаючим моментом M_{32} визначається за загальновідомою формулою:

$$\sigma = \frac{6 \cdot M_{32}}{a^2 \cdot b}. \quad (3.40)$$

Як відомо з опору матеріалів напруження в критичному перерізі не повинно перевищувати допустимого напруження для даного матеріалу, тобто повинна виконуватися умова:

$$\sigma \leq [\sigma],$$

де $[\sigma]$ – допустиме напруження для конкретного матеріалу (МПа).

У відцентровому млині ударної дії найбільш інтенсивне подрібнення матеріалу відбувається в периферійній зоні, де знаходяться елементи 1 та 2 робочого органу (рисунок 3.6). В цій зоні виникають аеродинамічні ефекти, що пов'язані з параметром h , які впливають на процес подрібнення. При виборі раціональних параметрів робочого органу необхідно враховувати вплив величини h на міцність робочого органу.

Зважаючи на вище наведене можна представити напруження в критичному перерізі σ як функцію від висоту h у вигляді

$$\sigma(h) = \frac{3 \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot (l_2^2 - l_1^2 \cdot h + l_2 \cdot h^2)}{a}. \quad (3.41)$$

Розглянемо робочий орган виготовлений зі сталі Ст3, з наступними параметрами системи:

$a=0,002$ м; $b=0,03$ м; $\rho=7850$ кг/м³; $h=0,007$ м; $l_1=0,048$ м; $l_2=0,109$ м; $l_3=0,11$ м; $n=3500-6000$ об./хв.

З рисунку 3.24 видно, що навіть при незначній висоті h , частота обертання є основним фактором, котрий визначає міцність робочого органу. Так для сталі Ст3, $[\sigma] = 160$ МПа, гранична частота обертання є 4000 об./хв, а для сталі 40 ХФА $[\sigma] = 660$ МПа, гранична частота обертання для даного робочого органу дорівнює 11600 об./хв.

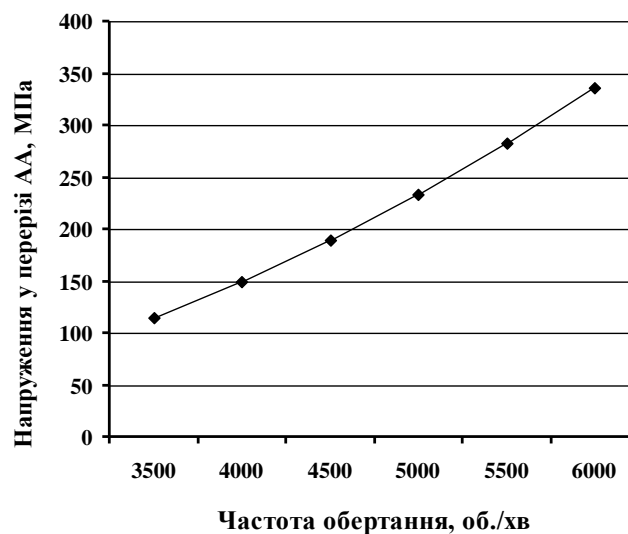


Рисунок 3.24 – Залежність напруження в перерізі АА від частоти обертання робочого органу

Розглянемо вплив конструктивних та режимних параметрів робочого органу на допустиму величину висоти h .

Для збільшення параметру h , при збереженні здатності робочого органу до опору деформації, є три шляхи: перший шлях – це застосування надміцних легованих сталей, таких як 40ХФА з допустимим напруженням 660 МПа; другий

шлях – збільшення діаметру робочого органу при зменшенні частоти обертання; третій шлях – збільшення товщини робочого органу (параметру a).

Розглянемо перший шлях. На рисунку 3.27 наведена залежність допустимої величини параметру h від частоти обертання, при збереженні здатності робочого органу до опору деформації для двох марок сталі: Ст3 та 40ХФА. Як видно з рисунку 3.25, застосування надміцної сталі дозволяє збільшити висоту периферійної зони в 2,1 рази.

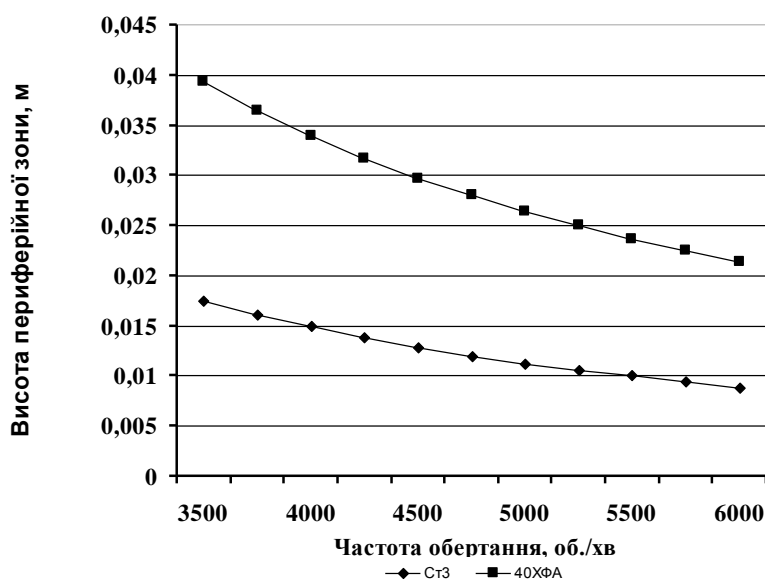
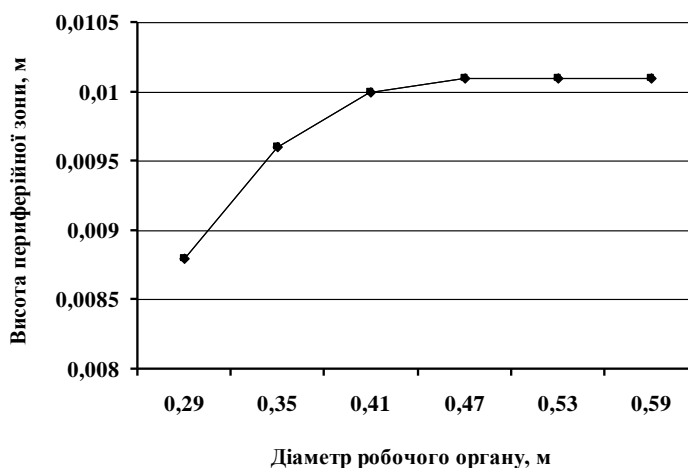
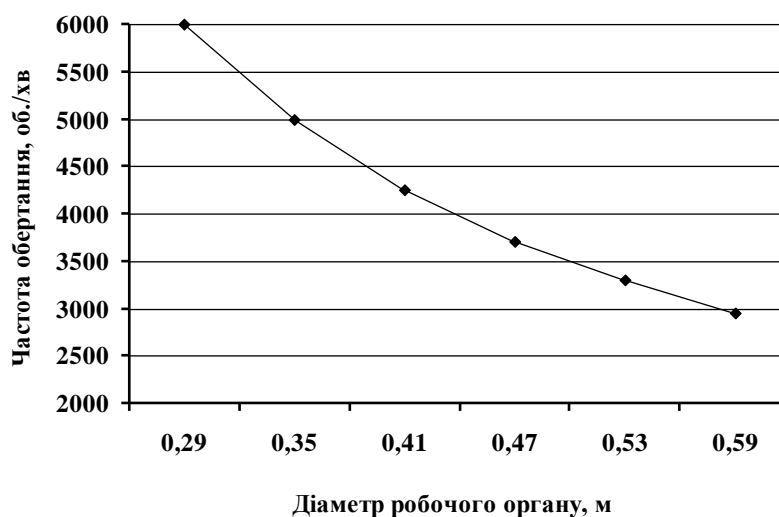


Рисунок 3.25 – Залежність допустимої висоти периферійної зони від частоти обертання

Розглянемо другий шлях. Лінійна швидкість на периферії досліджуваного робочого органу при частоті обертання 6000 об./хв складає 94 м/с. Взевши значення лінійної швидкості як константу розглянемо на скільки можна знизити частоту обертання робочого органу при збільшенні його діаметру і на скільки при цьому можна збільшити параметр h . На рисунку 3.26 приведена залежність висоти периферійної зони від діаметру робочого органу для Ст3 при збереженні стійкості робочого органу до деформації та сталому значенні лінійної швидкості, що складає 94 м/с.



а)



б)

Рисунок 3.26 – Залежність *а)* – висоти периферійної зони та *б)* – частоти обертання від діаметру робочого органу при сталій лінійній швидкості на периферії

Як видно з рисунку 3.26, другий спосіб дозволяє збільшити параметр h робочого органу, але має обмеження. Так, з аналізу цього шляху виявлено оптимальне співвідношення, з позиції стійкості до деформації, діаметру робочого органу і частоти обертання, а саме значення діаметру 0,47 м, та частоти обертання 3700 об./хв.

Третій шлях – це збільшення товщини робочого органу (параметру a), для аналізу застосовності цього способу представлений рисунок 3.27 на якому відображена залежність допустимої висоти периферійної зони від параметру a .

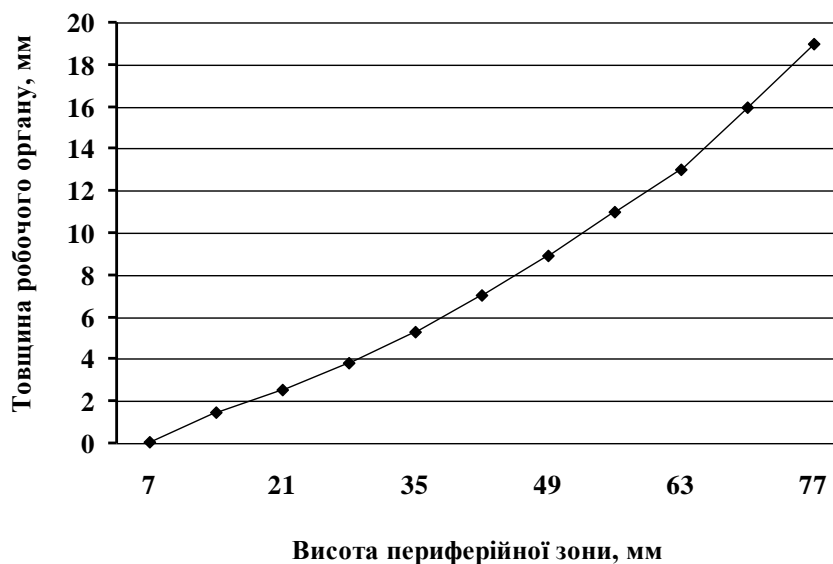


Рисунок 3.27 – Вплив товщини робочого органу на резерв підвищення висоти периферійної зони

З рисунку 3.27 видно, що фактично товщина робочого органу є безлімітним резервом можливості збільшувати висоту периферійної зони, але цей шлях має низьку недоліків, таких як підвищення металоємності, збільшення енерговитрат та зміну аеродинамічних властивостей робочого органу, що може призвести до зниження ефективності диспергування матеріалу.

Робочий орган відцентрового млина є пружним тілом складної просторової конфігурації. При обертанні навколо осі вала тіло знаходиться під дією статичних (сила ваги) та динамічних сил (сила інерції та момент опору зовнішнього середовища). Складність розрахунку обумовлена як складною формою тіла, так і тим, що момент опору є нерівномірно розподіленим навантаженням, форма якого визначається експериментально і діє він у площині обертання тіла. Таким чином тіло знаходиться під дією просторової системи сил у складному напружено-деформованому стані.

Існуючі на даний час аналітичні методи розрахунку напруженого стану

(наприклад метод характерних перетинів) базуються на значній схематизації фізичних властивостей матеріалу та геометричних параметрів тіла і не дозволяють врахувати такі особливості напруженого стану як концентрація напружень та різноманітні крайові ефекти. З іншого боку вони дають достатньо точні результати на простих моделях та можуть бути використані для перевірки адекватності більш сучасних та потужних числових методів, зокрема методу скінченних елементів (МСЕ).

На Рисунок 3.28 приведено схему робочого органу простої конфігурації. Геометричні параметри становлять: $L=0,12$ м; $H=0,008$ м; $l=0,028$ м; $b=0,002$ м; $a=0,03$ м;

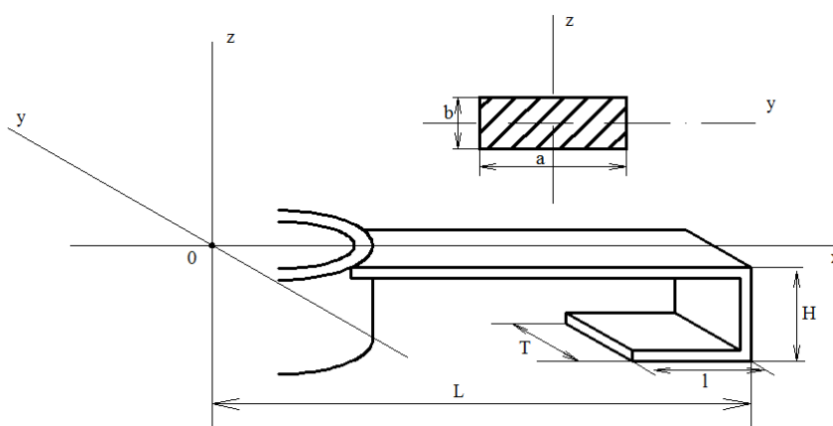


Рисунок 3.28 – Схема робочого органу відцентрового млина простої конфігурації

Оскільки тіло робочого органу відцентрового млина є суцільним та має постійний поперечний перетин, його можливо уявити стержньовою системою, нехтуючи силами ваги, які набагато менші за сили інерції. Тоді розрахункову схему можна показати на рисунку 3.29.

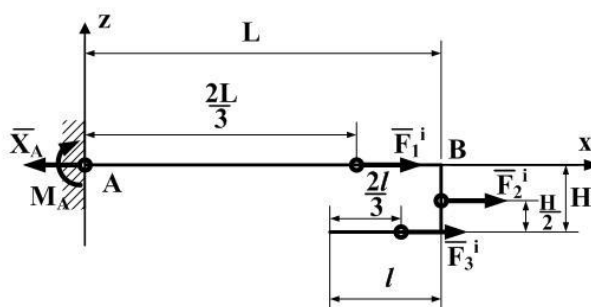


Рисунок 3.31 – Розрахункова схема робочого органу простої конфігурації

Тіло знаходиться у стані розтягнення та згинання з небезпечним перерізом у точці В, напруження в якому дорівнює:

$$\sigma = \frac{N_p}{A} + \frac{M_p}{W_z},$$

де N_p – розрахункове значення повздовжньої сили в перерізі В, Н;

A – площа поперечного перерізу тіла, (м²);

M_p – розрахункове значення згинального моменту в перерізі В, Н·м;

W_z – момент опору перерізу, (м³).

Розраховане таким чином напруження у небезпечному перерізі складає 180,3 МПа.

З метою визначення надійності роботи робочого органу розв'язувалась задача статичної пружності. Система стаціонарних диференціальних рівнянь статичної пружності для ізотропного матеріалу, яка включає рівняння руху і рівноваги, геометричне рівняння – тензор нескінченно малих деформацій (Ейлера або Лагранжа), та фізичне рівняння – узагальнений закон Гука, у символній формі має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \hat{\sigma} + \mathbf{f} = 0; \\ \hat{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\mathbf{u}\nabla + \nabla\mathbf{u}); \\ \hat{\sigma} = \frac{E}{1+\nu} \left(\hat{\varepsilon} + \frac{\nu}{1-2\nu} \hat{\mathbf{I}} \text{tr}(\hat{\varepsilon}) \right), \end{array} \right. \quad (3.42)$$

де ∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹; x_i , $i=1,2,3$ – декартові координати, м; $\hat{\sigma}$ – симетричний тензор напруження другого рангу, Па; (\cdot) – оператор скалярного добутку тензорів; \mathbf{f} – вектор об'ємних сил, наприклад, гравітаційних, інерційних Н/м³; $\hat{\varepsilon}$ – симетричний тензор другого рангу пружних деформацій; \mathbf{u} – вектор переміщення, м; E – модуль пружності, Па; ν – коефіцієнт Пуасона; $\hat{\mathbf{I}}$ – одиничний тензор другого рангу; $\text{tr}(\cdot)$ – оператор сліду тензора.

Граничні умови для (5):

– переміщення або защемлення (хоча б в одній точці на поверхні тіла) $\mathbf{u}|_{S_u} = 0$, де S_u – поверхня (або точка поверхні), на якій задано переміщення;

- симетрії $\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}|_{S_{su}} = 0$, де \mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі до поверхні тіла; S_{su} – поверхня симетрії тіла;
- зовнішні зусилля або вектор напруження $\hat{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \mathbf{n}|_{S_p} = \mathbf{p}$, де $\mathbf{p} = p^i$ – вектор напруження, що діє на поверхні S_p , Па;
- зовнішня сила, прикладена у точці тіла $\mathbf{F}_p = \int_{\Delta S_p} \hat{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \mathbf{n} dS$, де \mathbf{F}_p – вектор зовнішньої сили у точці P , Н; ΔS_p – елементарна площадка поверхні тіла в околі точки P , м².

Співвідношення для визначення запасу міцності. Еквівалентні напруження σ_{eqvM} за Мізесом визначаються за формулою

$$\sigma_{\text{eqvM}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)}, \text{ де}$$

$\sigma_{ij}, i, j = 1, 2, 3$ – компоненти тензора напруження, Па.

Запас міцності F_s пластичних матеріалів визначається за формулою

$$F_s = \frac{[\sigma_T]}{\sigma_{\text{eqvM}}},$$

де $[\sigma_T]$ – границя текучості матеріалу, Па; σ_{eqvM} – еквівалентне напруження за Мізесом, Па.

Розрахунок напруженого стану методом кінцевих елементів проведено з використанням програмного комплексу SolidWorksSimulations. Розрахункову схему створено за рахунок просторового моделювання тіла за даними вимірів. Матеріал тіла – звичайна вуглецева сталь $[\sigma] = 180$ МПа, модуль пружності $E = 200$ МПа. Збіжність розв'язку досягнуто використанням адаптивного методу розрахунку.

На рисунку 3.30 приведено тривимірну епюру розподілу нормального напруження по об'єму тіла. З епюри видно, що небезпечним перерізом є перегин пластини. Для кутової швидкості 512 с^{-1} максимальне напруження склало 194.5 МПа. Різниця між значеннями напружень, отриманих обома методами склала 7.3% . Окрім того видно, що напруження у перерізі розподілено нерівномірно. Максимальне значення напруження спостерігається по середині пластини,

мінімальне – по краях.

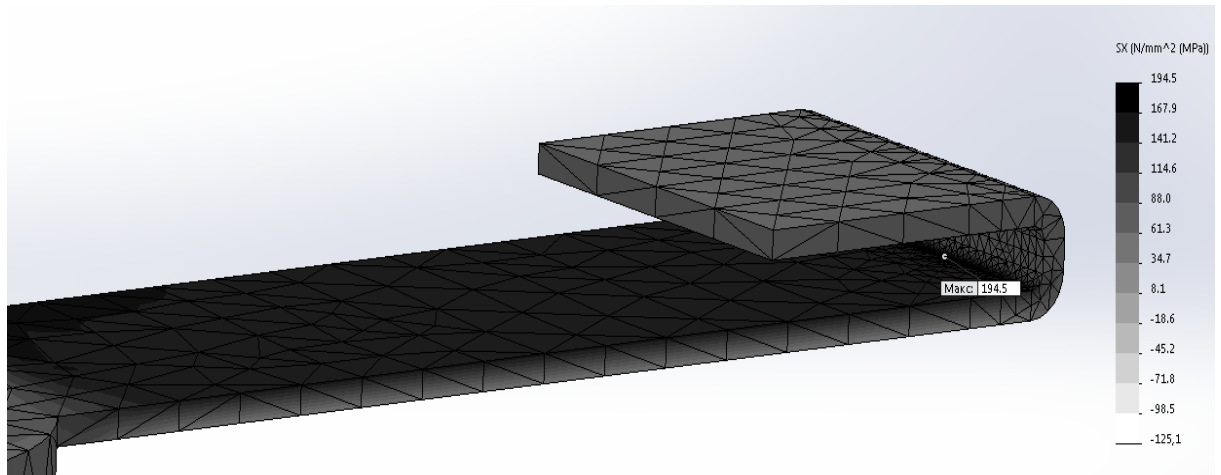


Рисунок 3.32 – Епюра нормальних напружень у робочому органі

Окрім того показано, що кінцево-елементна модель достатньо адекватна і може бути використана для розрахунку більш складних конструкцій робочого органу з врахуванням опору середовища.

Аналіз отриманих даних дозволив розробити більш міцну та ефективну конструкцію робочого органу. Замкнений контур дозволяє знизити згинальний момент у небезпечному перерізі при незначному підвищенні металоємності, що збільшує діапазон робочих частот роботи млина та збільшити ефективність подрібнення за рахунок розташування додаткових бильних елементів в області інтенсивного подрібнення.

Складна форма тіла та особливості навантаження не дозволяють дослідити напружений стан методом характерних перерізів. Для розрахунку на міцність використано розроблену кінцево-елементну модель та апробований метод розрахунку. Модель враховує як інерційну складову навантаження, так і момент опору середовища, який складає:

$$M_o = \xi \cdot \rho_c \cdot (1 + 0.03 \cdot \frac{d_{cp}}{d_{40}}) \cdot 1.148 \cdot \omega_p$$

де ρ_c – щільність середовища, у якому обертається робочий орган (кг/м^3); ξ – коефіцієнт лобового опору; ω_p – кутова швидкість ротора; d_{cp} – середній діаметр частинок у помольній камері; d_{40} – діаметр частинок 40 мкм.

На рисунку 3.31 приведено тривимірну епюру розподілу нормальних напружень при врахуванні лише сил інерції, а на рисунку 3.32 також враховуються сили лобового опору.

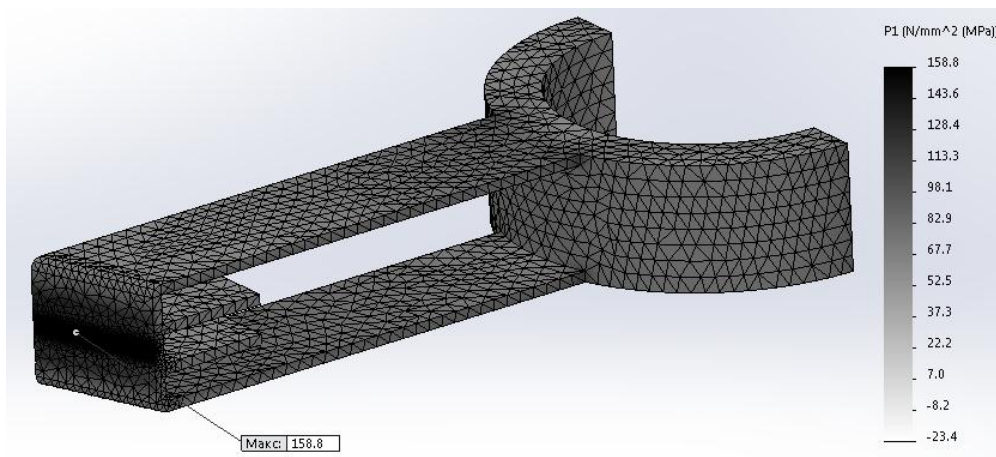


Рисунок 3.31 – Епюра нормальних напружень у робочому органі з 4 бильними елементами при врахуванні лише сил інерції (кутова швидкість 512 с^{-1})

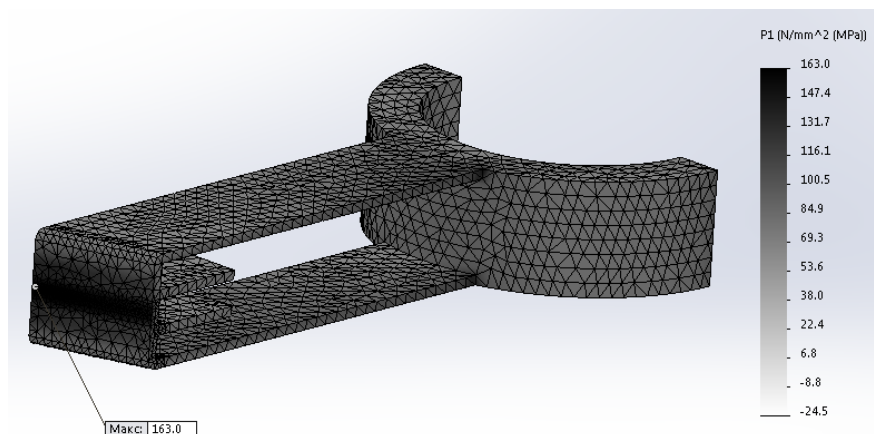


Рисунок 3.32 – Епюра нормальних напружень у робочому органі з 4 бильними елементами при врахуванні як сил інерції, так и нормального моменту опору, що діє в процесі подрібнення (кутова швидкість 512 с^{-1}).

З епюри видно, що використання розробленої конструкції дозволяє збільшити діапазон робочих швидкостей млина. При кутовій швидкості

512 с⁻¹ максимальне напруження складо 163 МПа. Критична швидкість обертання робочого органу складає 5184 об./хв.

3.7 Динаміка приводу відцентрового млина

Основи динаміки машин мають досить широко наведено в літературі. Однак незважаючи на велику кількість робіт з дослідження динаміки механічних систем різних машин, наразі відсутні дослідження динаміки відцентрових млинів запропонованих конструкцій.

Формування навантаження в приводі млина є складним динамічним процесом, що складається з багатьох факторів, котрі одночасно протікають, але якісно відрізняються. Зокрема, одночасно зі змінами сил опору робочого органу млина, що викликають відповідні перехідні процеси в приводі, в самій трансмісії млина розвивається коливальний процес, пов'язаний з періодичними активними збуджуючими силами в ремінних передачах та інших внутрішніх збурень.

3.7.1 Кінематична і динамічна схеми

Для створення промислових зразків млинів необхідно наукове обґрунтування параметрів млина в цілому й приводу, зокрема. З цією метою на базі експериментальних і теоретичних досліджень визначені навантаження, що діють на робочий орган млина в період пуску й у процесі здрібнювання матеріалу.

На рисунку 3.33 представлена кінематична схема відцентрового млина.

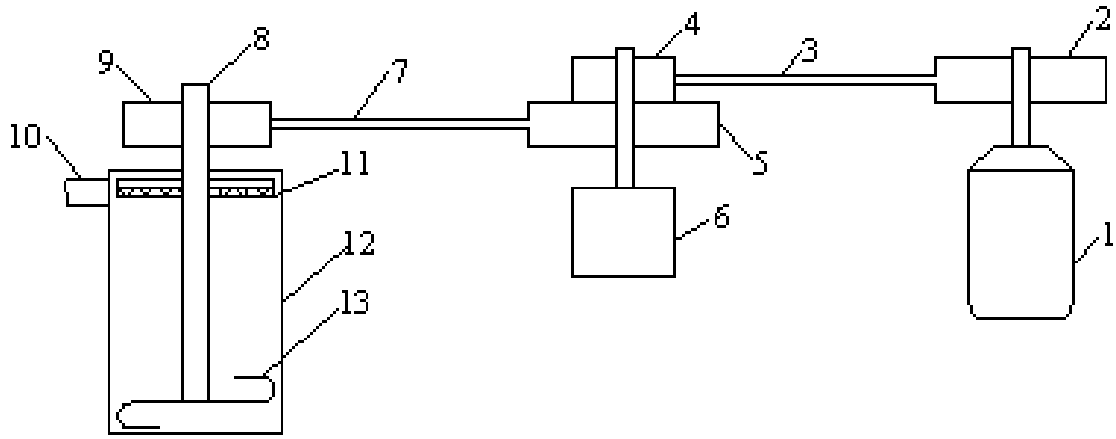


Рисунок 3.33 – Кінематична схема відцентрового млина

Від двигуна 1 через шківів 2, 4, 5, 9 та ремені 3, 7 обертовий момент двигуна передається на вал відцентрового млина 8 і розганяє вал до номінальної частоти обертання. Матеріал, що завантажується через полий вал 8 подрібнюється в робочому об'ємі помольної камери 12 робочим органом 13, а готовий продукт видаляється через вихідний патрубок 3 з потоком повітря, що нагнітається крильчаткою 11. Наявність проміжного вузла, що складається зі шківів 4,5 та підшипникового вузла 6 дозволяє регулювати частоту обертання млина від 4000 до 8000 об./хв. В загальному випадку млин можна представити як тримасову систему з зосередженими масами на валу ротора, валу проміжного ступіня та валу млина.

Приведена до валу двигуна динамічна схема системи млина наведена на рисунку 3.34. Приведені моменти інерції та жорсткості розраховувались відповідно формулам:

$$I_{1np} = I_1 \cdot \left(\frac{n_1}{n_{np}} \right)^2. \quad (3.42)$$

$$c_{1np} = c_1 \cdot \frac{1}{i^2}, \quad (3.43)$$

де I_{1np} – приведений момент інерції (Н·м²);

I_1 – момент інерції вузла, що приводиться (Н·м²);

n_1 – частота обертання вузла, що приводиться (об./хв);

n_{np} – частота обертання вузла до якого приводиться (об./хв);

c_{1np} – приведена жорсткість (кг·м);

c_1 – жорсткість елемента, що приводиться (кг·м);

i – передаточне число між вузлом, що приводиться та центром приведення.

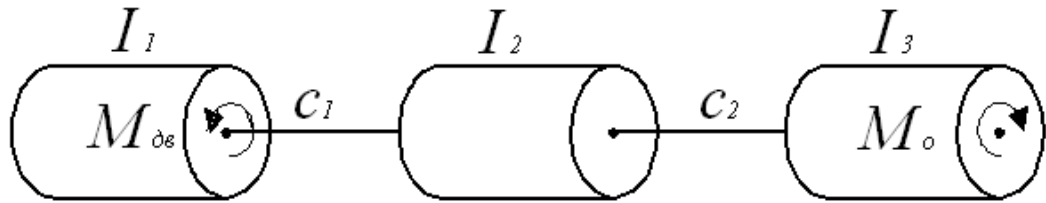


Рисунок 3.34 – Еквівалентна динамічна схема відцентрового млина з S – подібним робочим органом: I_1 – момент інерції ротора двигуна з приєднаним до нього шківом; I_2, I_3 – приведені моменти інерції проміжного валу зі шківом та валу робочого органа зі шківом; c_1, c_2 – приведена жорсткість першої та другої ступені пасових передач

Як видно з кінематичної схеми відцентровий млин можна представити як трьохмасову динамічну систему параметри котрої наведені у таблиця 3.1 та таблиця 3.2.

Таблиця 3.1

Параметри ременів

Найменування ременя	Ефективна довжина, см	Приведена податливість, рад/кг·см	Приведена жорсткість, кг·м
В/17 1000	26,858	$2,259 \cdot 10^{-5}$	442,5
		$6,365 \cdot 10^{-5}$	157,1
В/17 1120	40,678	$4,177 \cdot 10^{-5}$	239,4
		$9,398 \cdot 10^{-5}$	106,4

Таблиця 3.2

Параметри вузлів млина

№ шкиву	Зовнішній діаметр, мм	Внутрішній діаметр, мм	Маса, кг	Момент інерції, кг·м ²	Місце посадки
1	112	38	3.51	4.294*10 ⁻³	Проміжний вал
2	112	60	2.659	3,34*10 ⁻³	Проміжний вал
3	168	38	9,374	0,027	Вал млина
4	188	38	6,483	0,024	Двигун
Вал	60	45	10,05	5,088*10 ⁻³	Млин

Формування навантаження в механічній системі млина визначає електромагнітний момент двигуна та момент опору на робочому органі. Момент опору на робочому органі змінюється від початкового моменту $M_{ст}$ до номінальної величини $M_{ном}$. Початковий момент – це момент, що необхідно прикласти до робочого органу для його зрушення. Величина початкового моменту залежить від ступеня заповнення робочого об'єму млина і властивостей матеріалу. Для твердого залишку піролізу зношених шин залежність $M_{ст}$ від ступеня заповнення робочого об'єму $\psi = V_{пк}/V_{м}$ ($V_{пк}, V_{м}$ – об'єми помольної камери та матеріалу відповідно) показано на рисунку 3.35

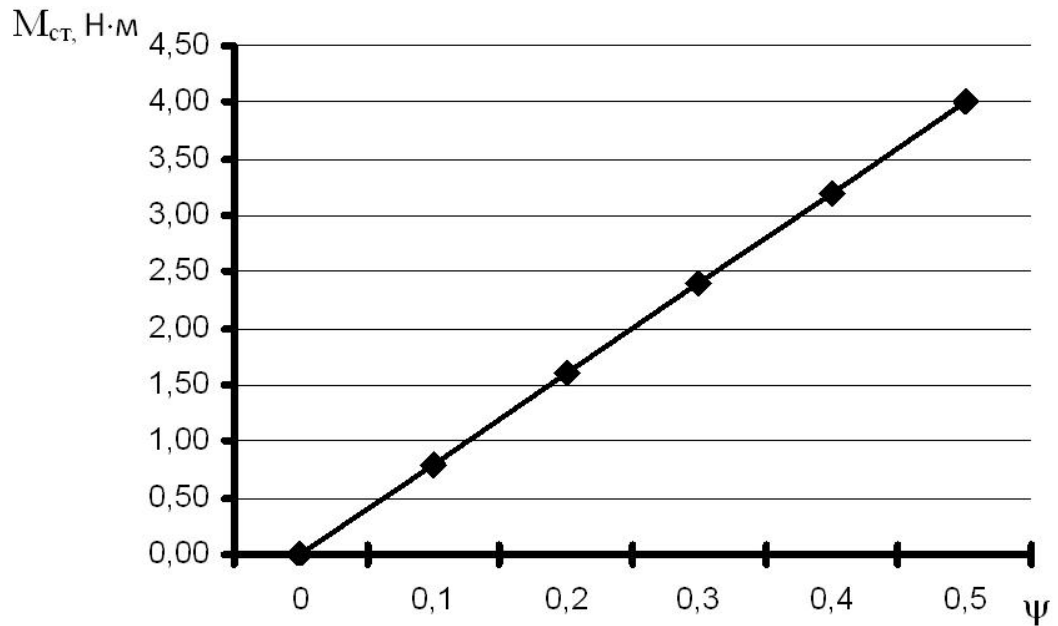


Рисунок 3.35 – Експериментальна залежність початкового моменту опору від ступеня заповнення робочого об'єму камери

В період розгону можна припустити, що момент опору змінюється за вентиляторним законом, тобто пропорційно квадрату швидкості. Тоді момент опору в період пуску можна представити у вигляді

$$M_{\text{оп}}(\varphi_3) = M_{\text{ст}} + \frac{M_{\text{ном}} - M_{\text{ст}}}{\omega_{\text{н}}^2} \cdot \dot{\varphi}_3^2, \quad (3.44)$$

де $M_{\text{оп}}(\varphi_3)$ – момент опору на робочому органі (Н·м); $M_{\text{ст}}$ – початковий (статичний) момент опору (Н·м); $M_{\text{ном}}$ – номінальний момент опору (Н·м); $\omega_{\text{н}}$ – номінальна кутова швидкість (с^{-1}); $\dot{\varphi}_3$ – кутова швидкість робочого органу.

Залежність $M_{\text{оп}}(\varphi_3)$ надалі будемо називати характеристикою млина. Номінальна величина моменту, що діє на робочий орган при досягненні номінальних швидкостей визначається залежністю відповідно до (3.44).

3.7.3 Визначення власних частот коливань механічної системи млина

У загальному випадку, зосереджені маси, що обертаються, можуть бути джерелом збурювання змушених коливань з частотою, яка дорівнює частоті обертання відповідної маси. Для виключення резонансних режимів необхідно, щоб частоти збурюючих сил не співпадали з частотами власних коливань, що визначаються за формулою [98]

$$p^2 \cdot \left[\frac{I_1 I_2 I_3}{C_1 C_2} \cdot p^4 - \left(\frac{I_2 + I_3}{C_1} \cdot I_1 + \frac{I_1 + I_2}{C_2} \cdot I_3 \right) \cdot p^2 + I_1 + I_2 + I_3 \right] = 0, \quad (3.47)$$

Відповідно до цієї формули визначено частоти власних коливань системи, які дорівнюють: $p_1=59$ Гц, $p_2=110,5$ Гц, а частоти збурюючих сил дорівнюють $\omega_1=148$ (c^{-1}), $\omega_2=273$ (c^{-1}), $\omega_3=408$ (c^{-1}). Для дослідного млина частоти власних коливань і збурюючих сил суттєво відрізняються, тому резонансні режими неможливі.

3.7.2 Динаміка пуску

Періодичний характер руху, що притаманний будь якому ланцюгу машини, також характерний і для відцентрового млина.

Характеристика двигуна представлена на рисунку 3.36 і має графічний вигляд.

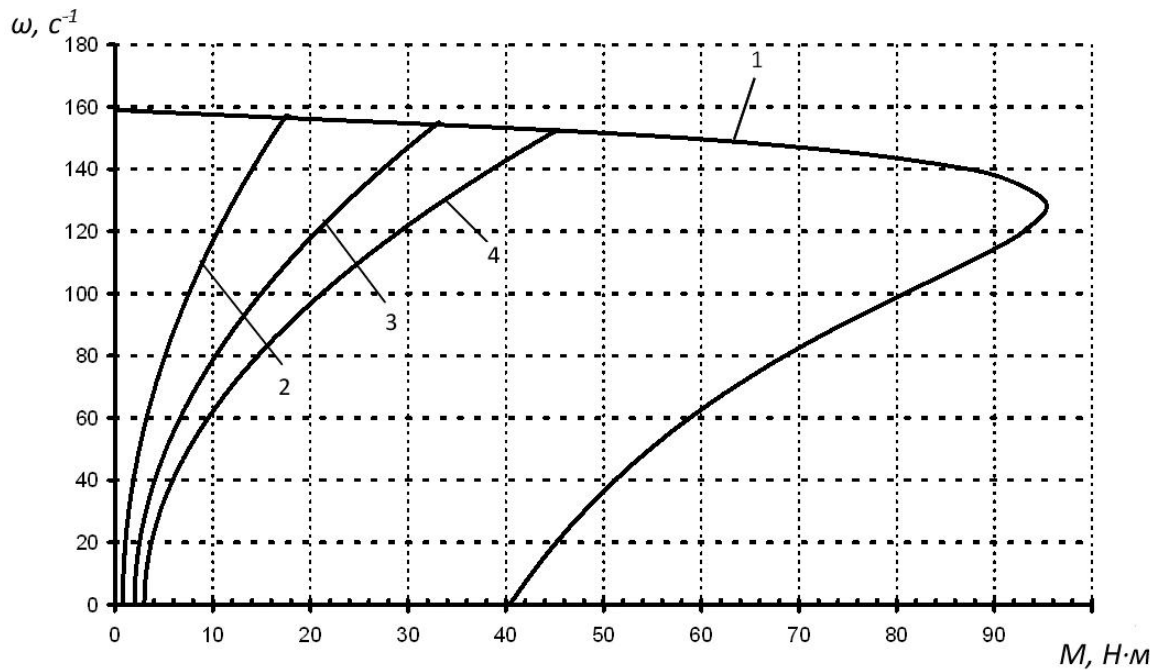


Рисунок 3.36 – Статичні характеристики двигуна и млина: 1 – характеристика двигуна; 2, 3,4 – характеристика млина при ступені заповнення 0; 0,3 і 0,5 відповідно

Попередні лабораторні дослідження показали, що максимального значення момент опору досягає в початковий період. У процесі здрібнювання його величина знижується практично за лінійним законом і досягає мінімальної величини наприкінці процесу здрібнювання. Момент опору змінюється відповідно до закону (3.44).

Знаючи закон зміни моменту опору в часі можна визначити потужність двигуна з умови нагрівання його обмоток до температури, що допускається. Обрана потужність повинна задовольняти умовам пуску. Для цього необхідно визначити час пуску й прирівняти її до величини, що допускається. З цією метою розроблена математична модель динаміки приводу, яка крім часу пуску млина дозволяє визначити динамічні навантаження в механічній системі й вибрати його раціональні параметри. Система диференціальних рівнянь, що описує динамічні процеси у відцентровому млині має вигляд:

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\varphi}_1 + \mu_1 (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + c_1 (\varphi_1 - \varphi_2) = M_{\text{дв}} (\dot{\varphi}_1); \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 - c_1 (\varphi_1 - \varphi_2) - \mu_1 (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + c_2 (\varphi_2 - \varphi_3) + \mu_2 (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) = 0; \\ I_3 \ddot{\varphi}_3 - c_2 (\varphi_2 - \varphi_3) - \mu_2 (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) = -M_o (\dot{\varphi}_3, t), \end{cases} \quad (3.45)$$

де, I_1, I_2, I_3 – моменти інерції двигуна, вузла трансмісії та робочого органу відповідно, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – кут повороту ротора двигуна, шківу трансмісії, робочого органу млину відповідно, рад;

c_1, c_2 – жорсткість ланцюгів трансмісії, $\text{кг} \cdot \text{м}$;

μ_1, μ_2 – коефіцієнти сил в'язкого опору, $\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$;

$M_{\text{дв}}(\dot{\varphi}_1), M_o(\dot{\varphi}_3, t)$ – обертовий момент двигуна та момент опору робочого органу.

$$M = \frac{2M_{\text{max}} \cdot \left(1 + \frac{x_1}{r_0}\right)}{\frac{s_m}{s} + \frac{s}{s_m} + 2 \frac{x_1}{r_0}}. \quad (3.46)$$

де M – момент на валу двигуна ($\text{Н} \cdot \text{м}$); s – дійсне ковзання; s_k – критичне ковзання; x_1 – активний опір фази статора (Ом); r_0 – повний реактивний опір двигуна (Ом).

Скориставшись методами математичного моделювання, та взявши за основу систему диференціальних рівнянь (3.45), розглянемо динамічні процеси у відцентровому млині при максимальному мінімальному та робочому навантаженню млина.

На рисунку 3.37 а, представлена динаміка пуску млина при ступені заповнення 0,3. На рисунку 3.37 б, пуск при навантаженні (ступінь заповнення 0,4), а на рисунку 3.37 в, при максимальному навантаженні млина (ступінь заповнення 0,5).

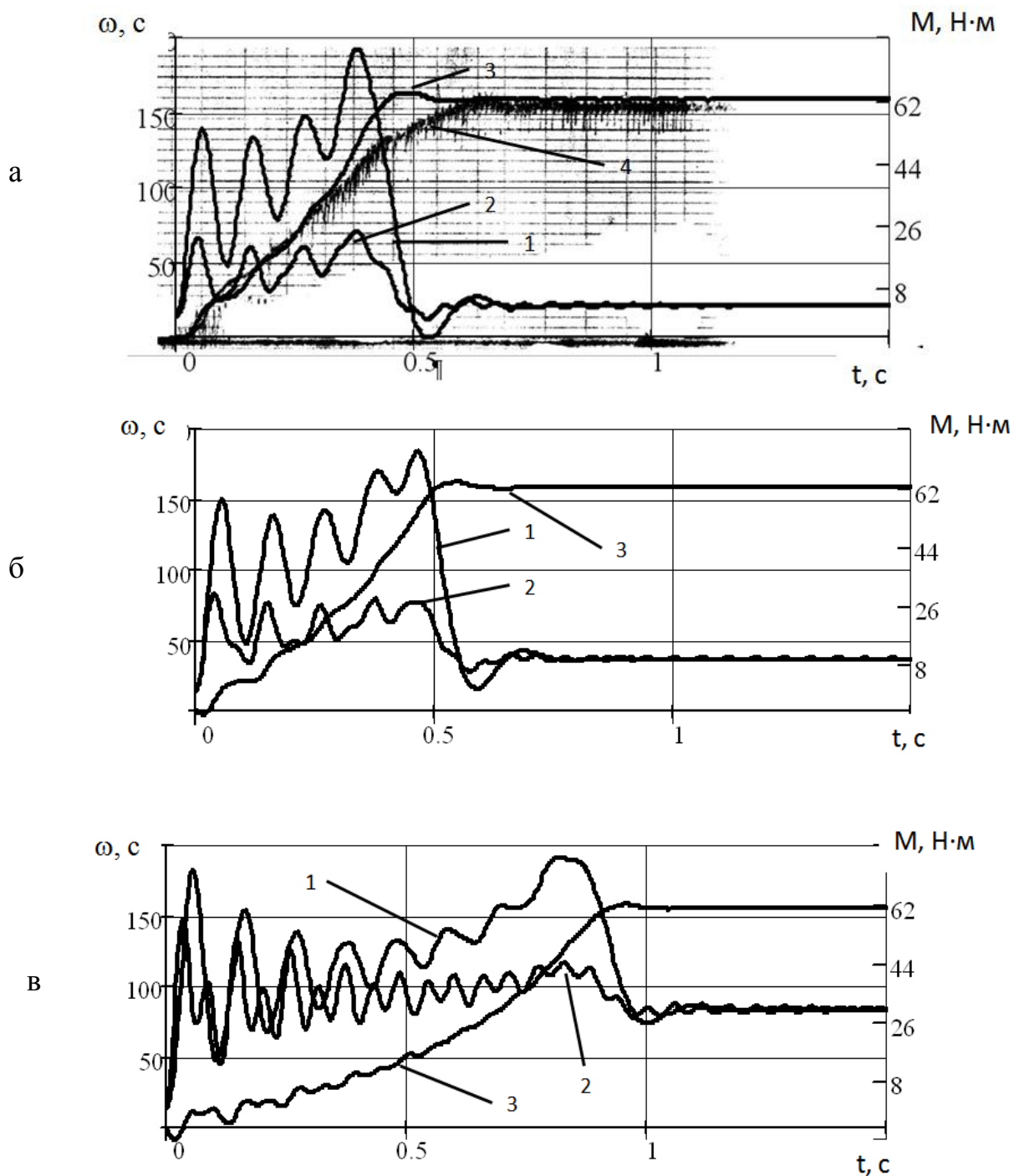


Рисунок 3.37 – Динаміка пуску відцентрового млина: а,б,в – ступінь заповнення млина 0,3, 0,4, 0,5 відповідно; 1,2, – крутний момент в ланках передач з жорсткістю C_1 і C_2 відповідно; 3, 4 – розрахункові та експериментальні залежності кутової швидкості робочого органу млина від часу

3.7.4 Вибір потужності двигуна за часом пуску

Важливим питанням при проектуванні млина є вибір та розрахунок електродвигуна виходячи з вимог до часу пуску та допустимих динамічного та статичного моментів опору двигуна.

Динамічний момент призводить до зміни частоти обертання електроприводу відповідно до закону

$$M_{\text{дв}} - M_{\text{он}} - J \frac{d\omega}{dt} = 0, \quad (3.48)$$

де J – приведений момент інерції системи ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$);

Час, необхідний для кінцевої зміни кутової швидкості від нуля до заданої визначається відповідно до

$$t_{\text{пуску}} = J \frac{\int_0^{\omega_{\text{ном}}} d\omega}{(M_{\text{дв}} - M_{\text{он}})}. \quad (3.49)$$

Таким чином для відцентрового млина час пуску визначається відповідно до формули

$$t_{\text{пуску}} = J \frac{\omega_{\text{ном}}}{(M_{\text{дв}} - M_{\text{он}})}, \quad (3.50)$$

$$t_{\text{пуску}} \leq t_{\text{допустиме}} \quad (3.51)$$

У загальному вигляді розрахунок необхідної потужності електродвигуна під час проектування відцентрового млина може бути виконаний відповідно до формул (3.50) (3.51):

3.8 Висновки

1. Запропонована методика розрахунку моменту сил опору діючих на робочий орган відцентрового млина та споживаної потужності млина з досліджуваним робочим органом

2. Показано, що при розрахунку на міцність робочого органу *S*-подібної форми визначальним є напруження від сил інерції, що обмежує можливість збільшення висоти периферійної зони.

2. Зміна параметру ширини робочого органу не впливає на напруження у критичному перерізі.

3. Збільшення діаметру робочого органу приблизно до 0,5 м, при збереженні сталої лінійної швидкості, зменшує напруження у критичному перерізі, що дозволяє збільшити параметр *h*.

4. Збільшення товщини призводить до зменшення напруження в критичному перерізі, що дозволяє збільшувати параметр *h*, в той же час збільшення товщини призводить до підвищення питомих енерговитрат.

5. Аналітично досліджено динамічні процеси у відцентровому млині та отримані графіки моменту та швидкості за різних режимів пуску.

6. Випробування показали, що раціональною формою робочого органу відцентрового млина є *S*-подібна форма, що дає змогу за інших рівних умов отримати на 2,9 % більше класу <40 мкм порівняно з *Z*-подібним робочим органом.

7. Як видно з результатів дослідження збільшення довжини ділянки l_1 з 2 см до 8 см дає змогу за 1 хв подрібнення твердого залишку піролізу зношених автомобільних шин збільшити на виході клас менше 40 мкм на 3,2 %

8. Вихід кількості класу матеріалу менше 40 мкм при збільшенні відстані між бильними елементами *S*-подібного робочого органу понад 4 мм зменшується.

9. Споживання потужності в період пуску за різної відстані між бильними елементами *S*-подібного робочого органу коливалося в однакових межах, опісля в стійкому режимі потужність, що споживалася виявилася рівною і склала 1,73 кВт.

10. Найбільша інтенсивність процесу подрібнення ТЗП відбувається на периферії помольної камери, в зоні 10-15 % від діаметру робочого органу.

11. Збільшення кількості бильних елементів на робочому органі від 2 до 4-х дозволило не лише підвищити інтенсивність процесу подрібнення, а й знизити питомі енерговитрати в 1,84 рази.

Перелік посилань

90. Пат. 90631 С Україна, МПК В02С 13/14. Відцентровий млин ударної дії / Виноградов Б.В. Ємельяненко В.І. Осташко І.О.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” - №а200905165; заявл. 25.05.2009; опубл. 11.05.2010; Бюл. №9.

91. Пат. 106127 С Україна, МПК В02С 13/286, В02С 18/08, В02С 18/22. Відцентровий млин / Гірін О.Б., Виноградов Б.В., Осташко І.О. Ємельяненко В.І.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” - № а201212853; заявл. 12.11.2012; опубл. 10.10.2013; Бюл.№ 19.

92. Пат. 106773 С Україна, В02С 13/14. Відцентровий млин ударної дії / Гірін О.Б., Виноградов Б.В., Осташко І.О.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” - № а201206487; заявл. 29.05.2012; опубл. 27.08.2013; Бюл.№ 16.

93. Пат. 106780 С Україна, В02С 13/14. Відцентровий млин / Гірін О.Б., Виноградов Б.В., Осташко І.О., Ємельяненко В.І.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” - № а201208908; заявл. 19.07.2012; опубл. 27.08.2013; Бюл.№ 16.

94. Осташко І.О. Обґрунтування параметрів робочого органу відцентрового млина / І.О. Осташко, Б.В. Виноградов // Вопросы химии и химической технологии. – 2012. – №5 – С. 182–184.

95. Vinogradov, B. Substantiation of key parameters of a centrifugal mill intended for grinding solid residue from the pyrolysis of used automobile tyres / B.V. Vinogradov, I.O. Ostashko // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. – 2016, 91, P. 133-141. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858.

96. Осташко, І.О. Аналіз міцності S-подібного робочого органу відцентрового млина / І.О. Осташко // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – №2. – С. 150-152.
97. Осташко І.О. Динаміка механічної системи відцентрового млина / І.О. Осташко, Б.В. Виноградов // Вопросы химии и химической технологии. – 2011. – №6. – С. 218-220.
98. Пат. 106773 С Україна, В02С 13/14. Відцентровий млин ударної дії / Гірін О. Б., Виноградов Б. В., Осташко І. О.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – № а201206487; заявл. 29.05.2012; опубл. 27.08.2013; Бюл. № 16.
99. Пат. 106780 С Україна, В02С 13/14. Відцентровий млин / Гірін О. Б., Виноградов Б. В., Осташко І. О., Ємельяненко В. І.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – № а201208908; заявл. 19.07.2012; опубл. 27.08.2013; Бюл. № 16.
100. Пат. 108288 С Україна, С08L 9/06, С08L 17/00. Гумова суміш для виготовлення нашпальних прокладок / Осташко І. О., Виноградов Б. В., Ващенко Ю. М., Гірін О. Б.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” - № а201309488; заявл. 29.07.2013; опубл. 25.04.2014; Бюл. № 8.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОДИНАМІКИ РОБОТИ ВІДЦЕНТРОВОГО МЛИНА

У помольній камері відцентрового млина в результаті обертання робочого органу розробленої конструкції виникають газодинамічні процеси: рух повітряних потоків в ламінарних і турбулентних режимах. Видалення готової фракції та взаємодія частинок подрібнюваного матеріалу з робочим органом, стінками камери та між собою, обумовлені саме газодинамікою потоків у помольній камері. Саме тому, важливим для розуміння процесу подрібнення матеріалу та сепарації готового класу з відцентрового млина є вивчення газодинаміки, що можливо втілити лише за допомогою математичного моделювання.

Для моделювання газодинамічних процесів у відцентровому млині необхідно розв'язати систему диференціальних рівнянь, що включає нестационарні рівняння Нав'є-Стокса та рівняння нерозривності потоку. Для числового розв'язання такої системи рівнянь існує велика кількість комп'ютерно орієнтованих програм, як комерційних ANSYS (CFX, Fluent), SolidWorks (Flow Simulation), так і відкритих програмних кодів, наприклад, OpenFOAM.

4.1 Геометрична модель відцентрового млина

У сучасних програмно-орієнтованих пакетах для числового розв'язання систем диференціальних рівнянь початковим етапом моделювання є створення 3D геометричної моделі, що повністю відображає геометрію досліджуваного об'єму проточної частини та пов'язаних з нею елементів конструкції відцентрового млина.

Елементами конструкції відцентрового млина, що утворюють геометрію проточної області представлені на рисунок 4.1: полий вал 1, робочий орган 2, помольна камера 3, диск між помольною та вивантажувальною камерами 4, вивантажувальний вентилятор 5 та відхідний патрубок 6.

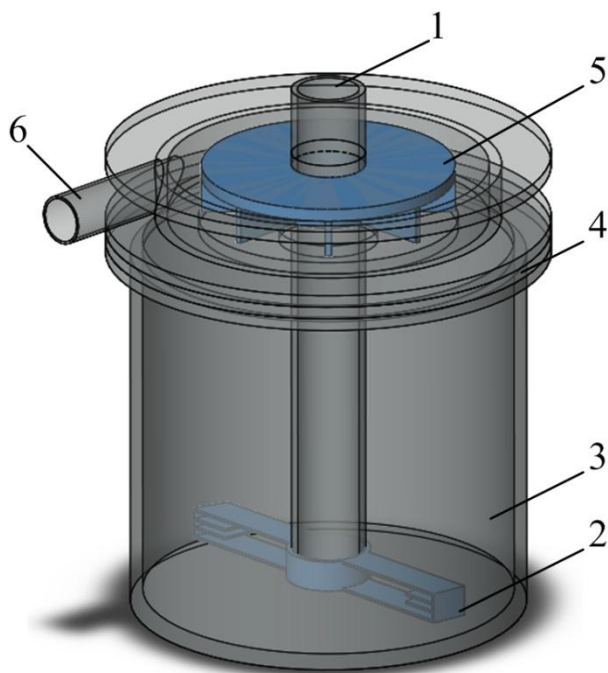


Рисунок 4.1 – Геометрична модель помольної камери відцентрового млина

Геометрична модель у повній мірі відображає не тільки розміри та геометрію вузлів відцентрового млина, а й їх точне взаємне розташування в просторі.

4.2 Математична модель газодинамічних процесів у відцентровому млині.

Основою для числового моделювання газодинамічних процесів є нестационарні рівняння Нав'є-Стокса. Загальновідома складність розв'язання рівняння Нав'є-Стокса полягає у тому, що вони мають властивості еліптичних рівнянь за просторовими координатами. Це означає, що збурення від будь якої точки потоку або границі можуть поширюватись в усіх напрямках потоку. Одночасно, рівняння Нав'є-Стокса за часом мають властивості параболічних рівнянь, тобто на розв'язок впливає лише передісторія розвитку потоку, а подальша поведінка потоку не впливає на розв'язок у даний момент. Саме тому, розв'язок шукають з використанням методу становлення. Суть методу полягає в тому, що для деякого стаціонарного потоку, описаного рівняннями Нав'є-Стокса із заданими граничними умовами, задається початкове поле течії і розв'язується нестационарна задача для рівнянь Нав'є-Стокса з тими ж граничними умовами. Нестационарна

задача розв'язується до того моменту часу, коли розв'язок за часом перестає змінюватися в межах заданої точності. Отриманий розв'язок приймається за розв'язок стаціонарної задачі. Такий метод можна застосовувати, якщо стаціонарний розв'язок існує і він єдиний, що може не завжди виконуватися, тому що ці рівняння нелінійні.

Числове розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса, наприклад, методом скінченних різниць ускладняються також тим, що ці рівняння нелінійні. Цю трудність зазвичай обходять шляхом лінеаризації рівнянь і застосування ітерацій. При розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса методом встановлення, просуваючись за часом крок за кроком, використовують найбільш простий метод лінеаризації рівнянь – перенесення рішення з попереднього кроку за часом на наступний або екстраполяцію розв'язку з двох попередніх кроків. Тоді на новому кроці за часом розв'язок стає наближено відомим і всі коефіцієнти рівнянь Нав'є-Стокса можуть бути наближено обчислені – рівняння стають лінійними, і для розв'язання системи дискретних рівнянь може бути використаний будь-який відповідний метод, наприклад один з варіантів методу прогонки. Після того, як отримано новий розв'язок на цьому кроці за часом, коефіцієнти рівнянь можуть бути знову обчислені і розв'язок повторюється. Такі ітерації проводяться до тих пір, поки не отримують прийнятну збіжність для даного моменту часу.

Система рівнянь Нав'є-Стокса з використанням $k - \omega$ моделі турбулентності, що взята за основу для неідеального газу записана в безрозмірному вигляді в декартовій системі координат має вигляд [101-102]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}}) = 0; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}})}{\partial t} + (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{v}} = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff}; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} k \tilde{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \tilde{G}_k - Y_k + S_k; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \omega \tilde{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_w} \right) \nabla \omega \right] + \tilde{G}_w - Y_w + D_w + S_w; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{E})}{\partial t} + \nabla \cdot \tilde{\mathbf{v}} (\bar{\rho} \tilde{E} + \bar{p}) = \nabla \cdot \left[\left(\lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \nabla \tilde{T} \right] + \nabla \tilde{\mathbf{v}} : \bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff} + q_v, \end{array} \right. \quad (4.1)$$

де ρ – густина, осереднена за Reynolds, кг/м³; t – час, с; ∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹; $\tilde{\mathbf{v}}$ – вектор швидкості, осереднений за Favre, м/с; p – тиск, осереднений за Reynolds, Па; k – турбулентна кінетична енергія, Дж/кг; ω – відносна швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності, с⁻¹; μ – динамічна в'язкість, Па·с; μ_t – турбулентна в'язкість, Па·с; σ_k – коефіцієнт ослаблення μ_t для малих чисел Reynolds; \tilde{G}_k – джерельний член для k , Вт/м³;

\tilde{G}_w – джерельний член для w , кг/(м³·с²); D_w – член, що враховує перехресну дифузію, кг/(м³·с²); \tilde{E} – масова повна енергія, Дж/кг; $\bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff}$ – тензор девіаторних напружень, Па; q_v – густина об'ємного джерела теплоти, Вт/м³; \tilde{T} – абсолютна температура, осереднена за Favre, К.

Початкові та граничні умови для (4.1) мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{v}(X) = 0; \\ \bar{p}(X) = p_0; \\ k(X) = k_0; \\ \omega(X) = \omega_0; \\ \tilde{T}(X) = \tilde{T}_0, \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{n} \cdot \tilde{\mathbf{v}} = 0; \\ \bar{p} = p_{ex}; \\ k = k_{ex}; \\ \omega = \omega_{ex}; \\ \tilde{T} = \tilde{T}_{ex}, \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{n} \cdot \tilde{\mathbf{v}} = \tilde{v}_{eux}; \\ \bar{p} = p_{eux}; \\ k = k_{eux}; \\ \omega = \omega_{eux}; \\ \tilde{T} = \tilde{T}_{eux}, \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \tilde{\mathbf{v}} = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla \bar{p} = 0; \\ k = 0; \\ \omega = \omega_{emi}; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla \tilde{T} = 0, \end{array} \right. \quad (4.2)$$

де $X(x,y,z) \in \Omega$ – декартові координати, м; Ω – розрахункова область

Математична постановка (4.1), (4.2) використана для числового моделювання газодинаміки відцентрового млина методом скінченних об'ємів в системі SolidWorks (Flow Simulation).

Кількість розрахункових комірок в проточному середовищі складає 866301, кількість ітерацій на одну продувку – 571. Основними цілями числового моделювання було визначити динамічний, статичний та повний тиск, а також поля компонент вектора швидкості потоку та її модуля. Розв'язок виконувався до отримання повної збіжності за параметрами повного тиску та сумарної швидкості в кожній точці проточної області.

4.3 Перевірка адекватності числової моделі та результатів моделювання

Для перевірки адекватності числової моделі та результатів моделювання було проведено зіставлення результатів моделювання рисунок 4.2 з експериментально отриманими даними при роботі млина зі знятою камерою та при роботі в камері [103].

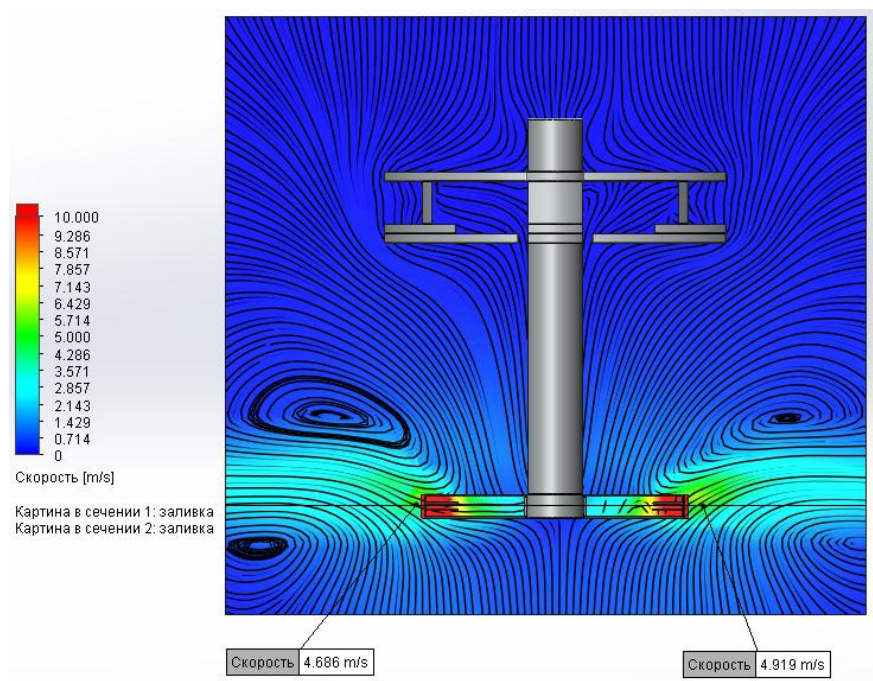


Рисунок 4.2 – Епюра розподілу швидкостей при знятій помольній камері

Результати зіставлення показали, що дані числового моделювання збігаються з експериментом рисунок 3.20 в межах похибки приладу.

На початковому етапі моделювання розглядалася газодинаміка процесу в проточній частині без завантаження матеріалу. На рисунку 4.3 показано результати розрахунків та експериментально зафіксованих значень швидкості повітря на виході з помольної камери відцентрового млина за різних частот обертання ротора.

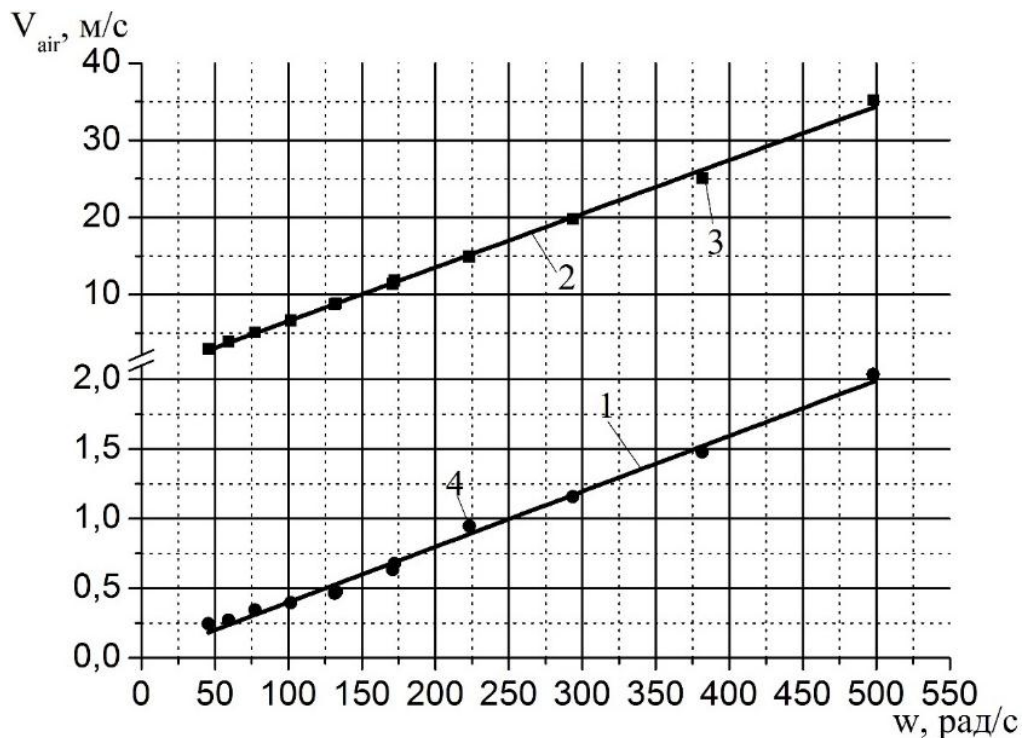


Рисунок 4.3 – Залежність швидкості повітряного потоку з вихідного патрубку від кутової швидкості: 1,4 – експериментальна та розрахункова криві відповідно для робочого орган; 2,3 – експериментальна та розрахункова криві відповідно для робочого орган та крильчатки

Як видно з вищенаведених графіків розбіжність між експериментальними та розрахунковими значеннями швидкості повітря на виході з помольної камери несуттєві та складають 8,2 %, що може бути обумовлено як похибками вимірювання, так і похибками розрахунку, що підтверджує адекватність розробленої числової моделі та достовірність результатів моделювання.

4.4 Загальний огляд газодинамічних процесів у робочому об'ємі

Аналіз результатів числового моделювання процесів у робочій камері показав, що потік повітря здійснює складний обертальний рух в повздовжньому та поперечному перерізах (рисунок 4.4 а, б) з утворенням локальних зон підвищеної турбулентності 1 (рисунок 4.4 б). Середня швидкість потоку матеріалу на периферії (в зоні бильних елементів) становить 12,6 м/с, а швидкість робочого органу 68,72 м/с. Таким чином, відносна швидкість зіткнення становить 56 м/с, тобто 81,5 % від швидкості обертання робочого органу.

Важливим, з точки зору підвищення ефективності подрібнення, є те що повітря з частинками матеріалу, проходячи через зазори між бильними елементами, збільшує швидкість до 31 м/с, а в зоні бильних елементів робочого органу утворюються турбулентні каверни, що сприяє концентрації матеріалу.

В результаті числового моделювання та аналізу результатів було виявлено, що в області робочого органу в поперечному перерізі повітряні потоки можна розділити на три групи, а саме: потоки перед робочим органом, область 1 (рисунок 4.4 а), що охоплюють зону на відстані 15-20 мм перед робочим органом; потоки за робочим органом, область 2 (рисунок 4.4 а), що охоплюють зону на відстані 60-70 мм за робочим органом; відносно незбурені потоки, область 3 (рисунок 4.4 а). Як зазначалося вище, вельми важливим фактором подрібнення є швидкість зіткнення матеріалу з робочим органом, тому, досліджено її залежність від кутової швидкості робочого органу (рисунок 4.5).

Відповідно до розташування визначених числовим моделюванням точок залежності було апроксимовано лінійними функціями з середньоквадратичним відхиленням 0,99 та 0,91 для прямих 1 та 2 (рисунок 4.5) відповідно. Більшу дисперсність при обробці результатів для області 1 можна пояснити високою турбулентністю, що вносить свою корекцію в розподіл поля швидкостей.

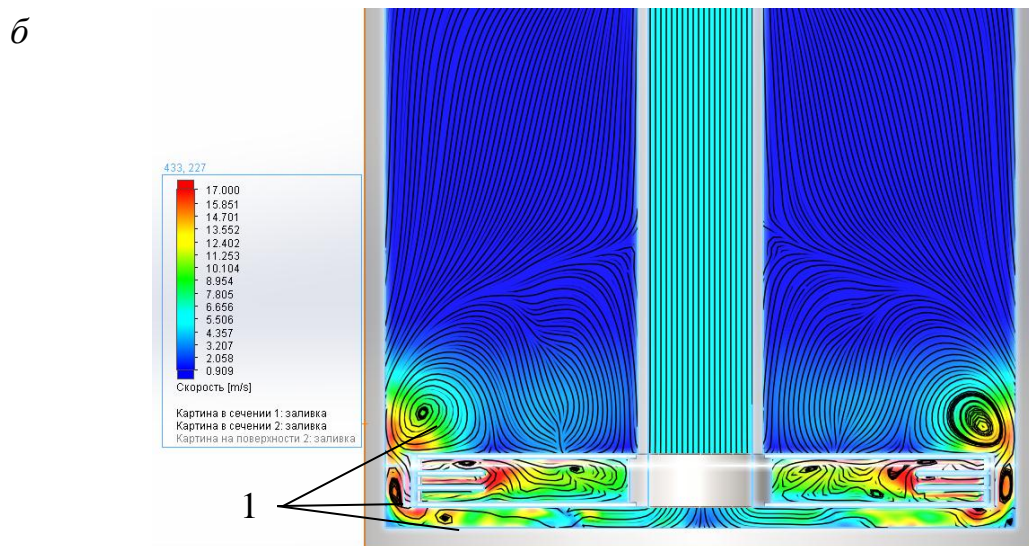
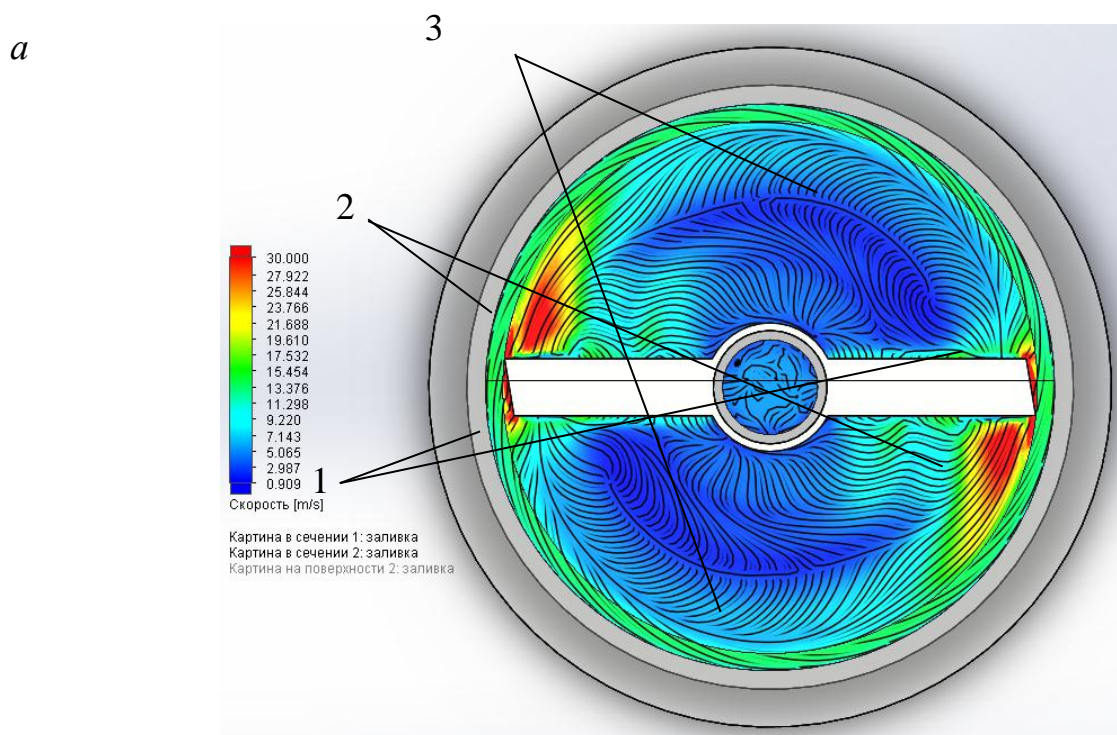


Рисунок 4.4 – Поля швидкостей та траекторій потоку при кутовій швидкості робочого органу 498 c^{-1} : а – повздовжній переріз, б – поперечний переріз.

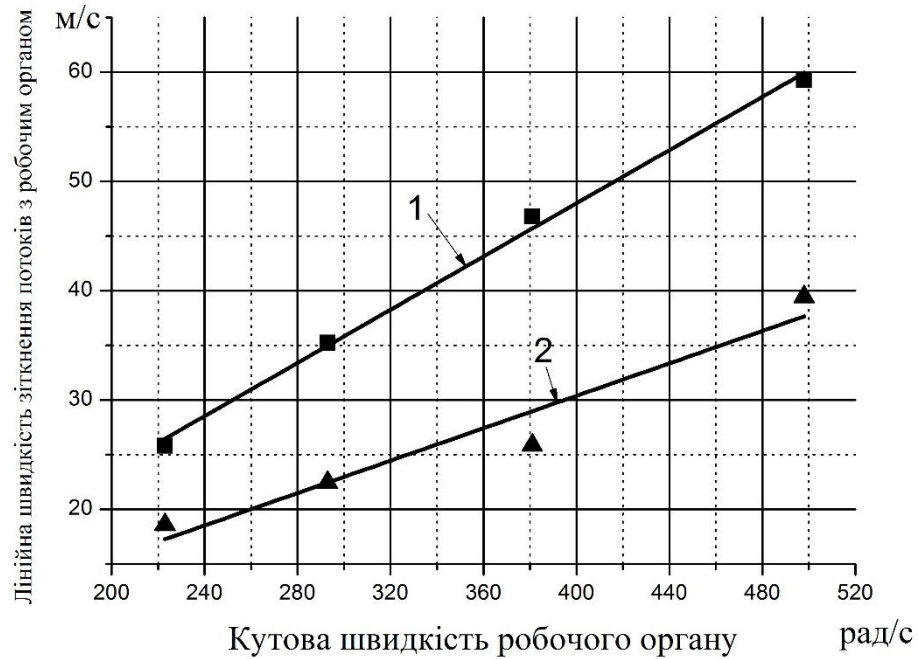


Рисунок 4.5 – Залежність лінійної швидкості зіткнення потоків повітря з робочим органом в області більних елементів: 1 – потоки області 3; 2 – потоки області 1.

Основним шляхом підвищення швидкості повітряних потоків є підвищення витрати транспортувального повітря, що в свою чергу впливає на аеродинаміку процесів у помольній камері млина. Саме тому цікавим буде дослідити вплив підвищення продуктивності пневмотранспорту на швидкість потоків у помольній камері млина.

Дослідження проводимо на основі математичної моделі опис та підтвердження адекватності якої наведено вище. Початковою точкою відліку для аналізу взято режим роботи при кутовій швидкості ротора млина 498 рад/с та продуктивності пневмотранспорту на рівні $9,62 \cdot 10^{-4}$ м³/с, що відповідає середній швидкості повітря в перерізі вихідної камери на рівні 1 м/с. Діаграма розподілу поля швидкостей та траєкторії потоків для точки відліку наведено на рисунку 4.6.

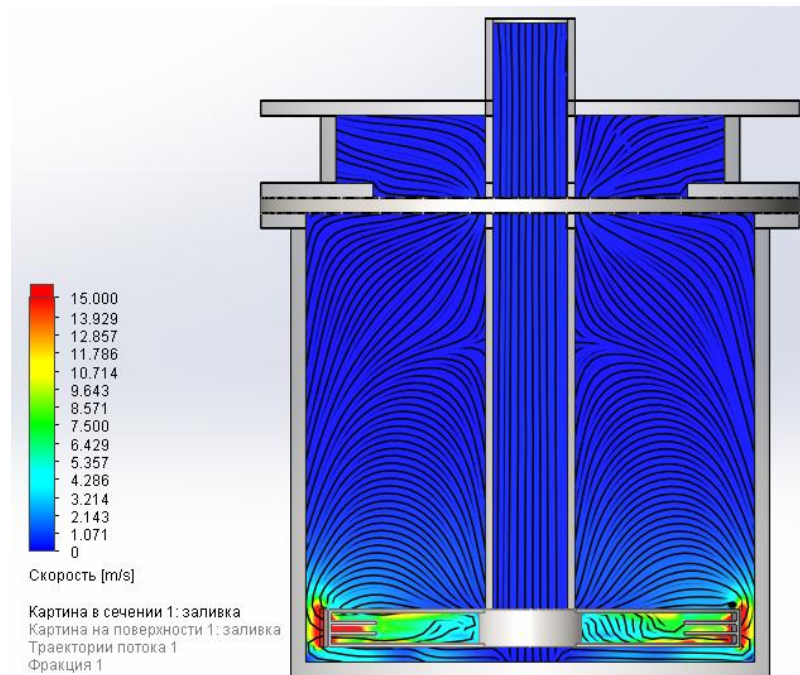


Рисунок 4.6 – Діаграма розподілу швидкостей та траєкторій потоку по висоті помольної камери при відносній витраті повітря $0,04 \text{ c}^{-1}$

Як видно з діаграми швидкостей найбільші швидкості потоків повітря знаходяться в безпосередньому наближенні до бильних елементів робочого органу на периферії, при цьому в інших частинах помольної камери швидкість потоків не перевищує двох метрів за секунду. Потоки мають яскраво виражену балістичну траєкторію. Вони починають свій рух від центру дна помольної камери та рухаються вздовж стінок камери при цьому мають кручення по спіралі і рухаються вниз коло стінки полого вала. Спостерігається, що точка розділу потоків, котрі обертаються в нижній частині помольної камери та потоків, що рухаються у верхній частині знаходиться на висоті 60 % від висоті камери.

При подальшому збільшенні витрати транспортувального повітря до 3 м/с (рисунок 4.7) спостерігається зміна траєкторії потоків. Точка розподілу потоків піднімається на висоту 90-95% від висоті помольної камери, біля стінок камери вище робочого органу утворюються кишені, в яких швидкість потоків зростає до 15 м/с та більше. В той же час, в центральній частині на висоту 45 % від висоти камери швидкість піднімається до 7 м/с . У розвантажувальній камері спостерігається утворення закрученого турбулентного потоку.

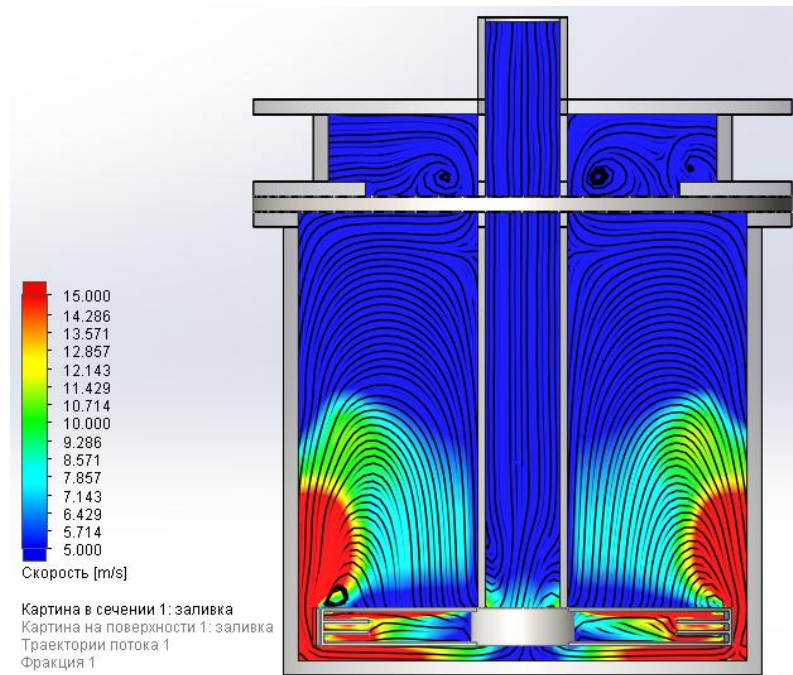
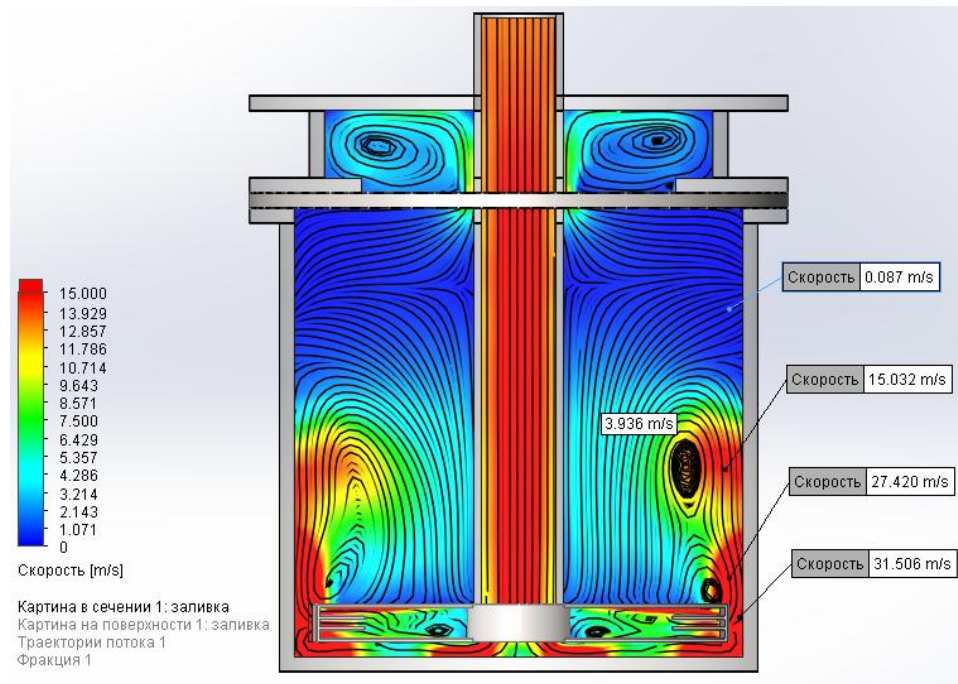


Рисунок 4.7 – Діаграма розподілу швидкостей та траекторій потоку по висоті помольної камери при відносній витраті повітря $0,16 \text{ c}^{-1}$

Подальше збільшення відносної витрати повітря через помольну камеру до $0,59 \text{ c}^{-1}$ призводить лише до збільшення швидкості потоків та суттєво не впливає на траєкторію потоків. Починаючи з відносної витрати $0,59 \text{ c}^{-1}$ спостерігається утворення другої кишені потоків з закрученим турбулентним режимом над першою, при цьому розміри першої області зменшуються (рисунок 4.7). Помітно також зниження граничної точки між групами потоків на 10-15% від висоти помольної камери.

Подальше збільшення відносної витрати транспортувального повітря є небажаним оскільки починають виноситися частинки розміром 120 мкм і більше. Як видно з діаграми, швидкість потоку між робочим органом та стінкою камери становить більше 30 м/с у нижній кишені дещо нижча $23\text{-}27 \text{ м/с}$, а у верхній $9\text{-}15 \text{ м/с}$. При цьому у кишенях спостерігається підвищення інтенсивності закручення турбулентних потоків, що ймовірно призводить до збільшення ефективності подрібнення.



Відносна витрата повітря $0,77 \text{ c}^{-1}$

Рисунок 4.8– Видалення готового класу з помольної камери при різних режимах роботи

Продуктивність млина обумовлена двома факторами: швидкістю утворення готового класу (швидкість подрібнення) та видалення з помольної камери готового класу. Тому, важливим науковим та практичним результатом є визначення залежності максимального розміру частинок, що видаляються з помольної камери від швидкості потоку та розрідження створеного на виході.

Траекторії руху твердих частинок визначаються інтегруванням за псевдо-часовими кроками рівняння балансу сил, що діють на частинку, записаного у Лагранжевій системі відліку

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) + \frac{\mathbf{g}(\rho - \rho_p)}{\rho_p},$$

де \mathbf{u} – вектор швидкості газового середовища, м/с; \mathbf{u}_p – вектор швидкості твердих

частинок м/с; $\mathbf{F}_D = \frac{18\mu C_D \text{Re}}{\rho_p d_p^2 24}$ – сила гідравлічного опору, віднесена до одиниці маси

частинки, 1/с; C_D – безрозмірний коефіцієнт гідравлічного опору; ρ_p – густина твердих

частинок кг/м³, d_p – усереднений діаметр твердих частинок, м; $Re = \frac{\rho d_p |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}|}{\mu}$ – число Рейнольдса.

Розрахункове визначення діаметру частинок, що видаляються потоком з помольної камери при різних швидкостях потоків представлено на (рисунок 4.8).

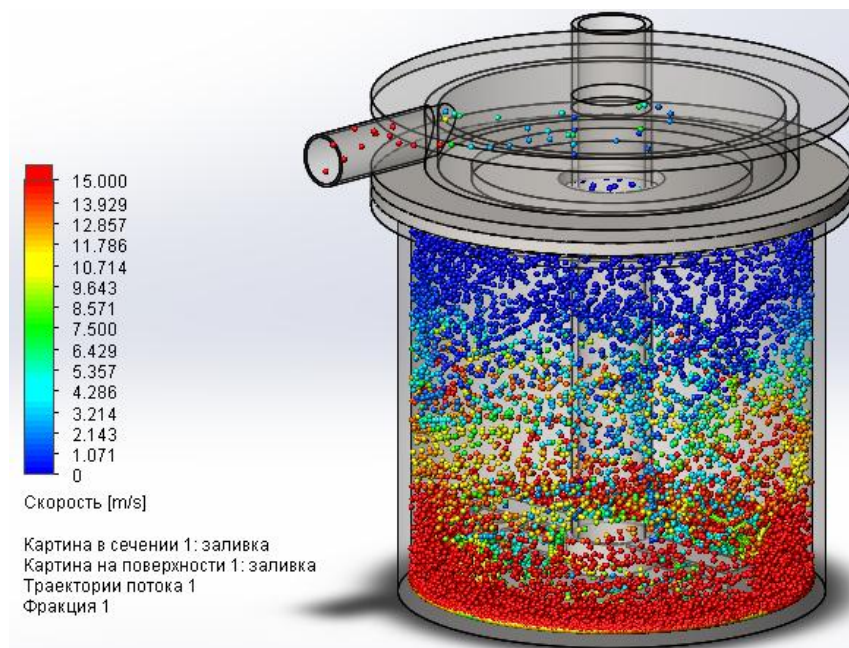


Рисунок 4.9 – Результати моделювання процесу класифікації та видалення готового класу при швидкості потоку на виході 9 м/с

Експериментально визначалися залежності максимального діаметру частинок d_{\max} , що видаляється з помольної камери від величини витрати повітря на виході. Для узагальнення отриманих результатів на рисунку 4.9 наведена залежність d_{\max} від відносної витрати повітря, що дорівнює відношенню витрати повітря до об'єму помольної камери $q=Q/V$ (Q – витрата повітря, V – об'єм камери).

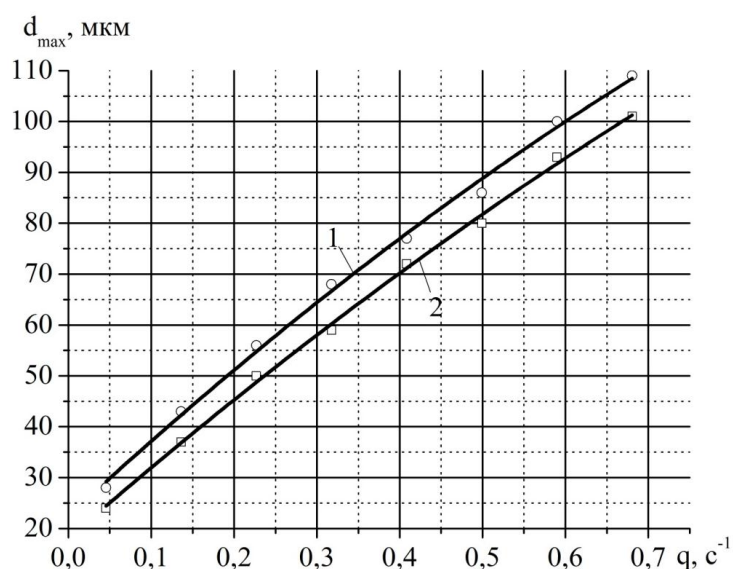


Рисунок 4.10 – Залежність максимального діаметру частинок, що видаляються з помольної камери від відносної витрати повітря на виході: 1, 2 – експериментальна та розрахункова залежності.

Аналіз отриманих даних підтверджує, що розроблена методика розрахунку дає змогу оцінювати крупність видаленого матеріалу з млина залежно від величини витрати повітря.

Використовуючи розроблену методику досліджено вплив тиску на виході відцентрового млина на розміри частинок видаленого матеріалу (рисунок 4.10).

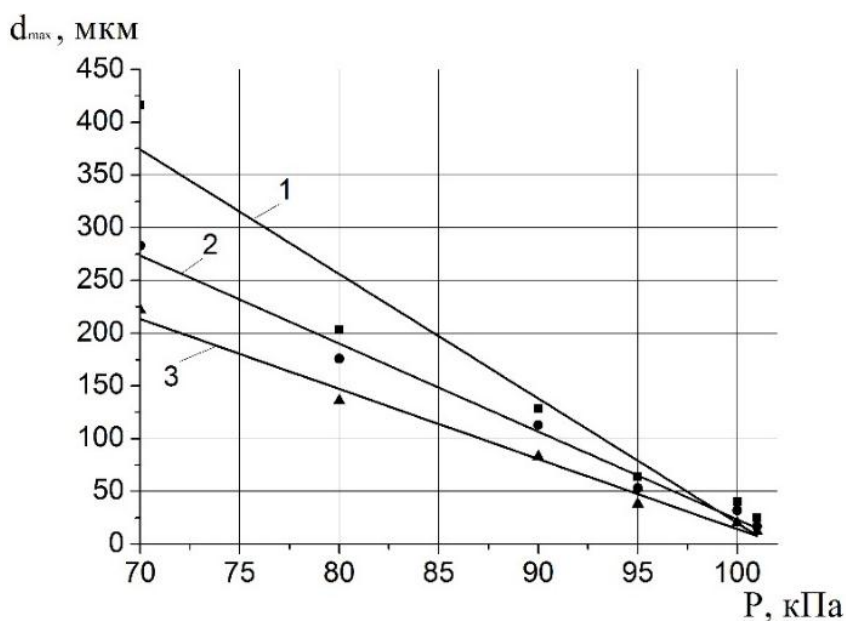


Рисунок 4.11 – Залежність максимального діаметру частинок, що видаляються з помольної камери від тиску на виході

Висновки

1. Розроблено методику дослідження аеродинамічних процесів в проточній частині відцентрового млина, яка дає можливість зробити оцінку газодинамічних потоків у помольній камері млина з урахуванням особливостей конструкції його проточної частини, робочого органу, параметрів подрібнюваного матеріалу та тиску на вході і виході, а також виявити закономірності впливу вищенаведених факторів на видалення максимального діаметру матеріалу, що подрібнюється. Порівняння експериментальних та розрахункових даних показує, що похибка не перевищує 15 %.

2. Встановлено, що крупність подрібнених частинок матеріалу, які видаляються з млина пропорційно залежить від витрати повітря і вакууметричного тиску на виході з розвантажувальної камери.

3. Лінійна та кутова швидкість зіткнення потоків повітря і твердих частинок з більшими елементами пропорційні кутовій швидкості робочого органу.

Перелік посилань

101. Карвацький А. Я. Механіка суцільних середовищ. Розв'язання задач [Текст]: навч. посіб. / А. Я. Карвацький — К.: НТУУ «КПІ» Вид-во «Політехніка», 2016. — 392 с.

102. Карвацький А.Я. Механіка суцільних середовищ [Електронний ресурс]: навч. посіб. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – 290 с.

103. Ostashko, I.O. Aeromechanics of processes in the flow part of a centrifugal mill / **I.O. Ostashko**, B.V. Vinogradov // Acta Mechanica Slovaca. – 2017, Vol. 21, №3, P. 51-57. ISSN: 1335-2393.

РОЗДІЛ 5

КІНЕТИКА ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ТА НАПРЯМКИ
ЗАСТОСУВАННЯ ТВЕРДОГО ЗАЛИШКУ ПІРОЛІЗУ

5.1 Залежність гранулометричного складу подрібненого твердого залишку піролізу від часу подрібнення у відцентровому млині

Гранулометричний склад подрібненого у відцентровому млині твердого залишку піролізу зношених автомобільних шин визначався методом лазерно-дифракційного аналізу (ЛДА) на Вольногірському металургійному комбінаті. Криві розподілу за класом частинок подрібненого ТЗП у відцентровому млині, через 2, 4, 6 хв представлені на рисунках 5.1–5.3.

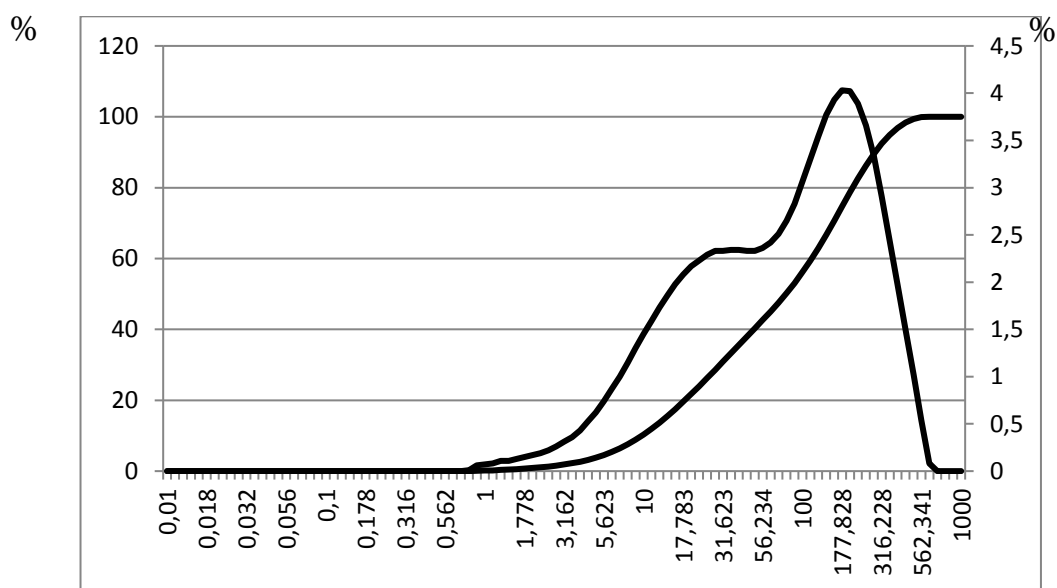


Рисунок 5.1 – Розподіл за класом частинок ТЗП після подрібнення на протязі 2 хв у помольній камері відцентрового млина

За аналізу рисунка 5.1 видно, що в перші 2 хв подрібнення відбувається інтенсивне руйнування вихідних частинок розміром 5-30 мм з отриманням частинок класу менше 600 мкм, тому коефіцієнт подрібнення складає 8-50.

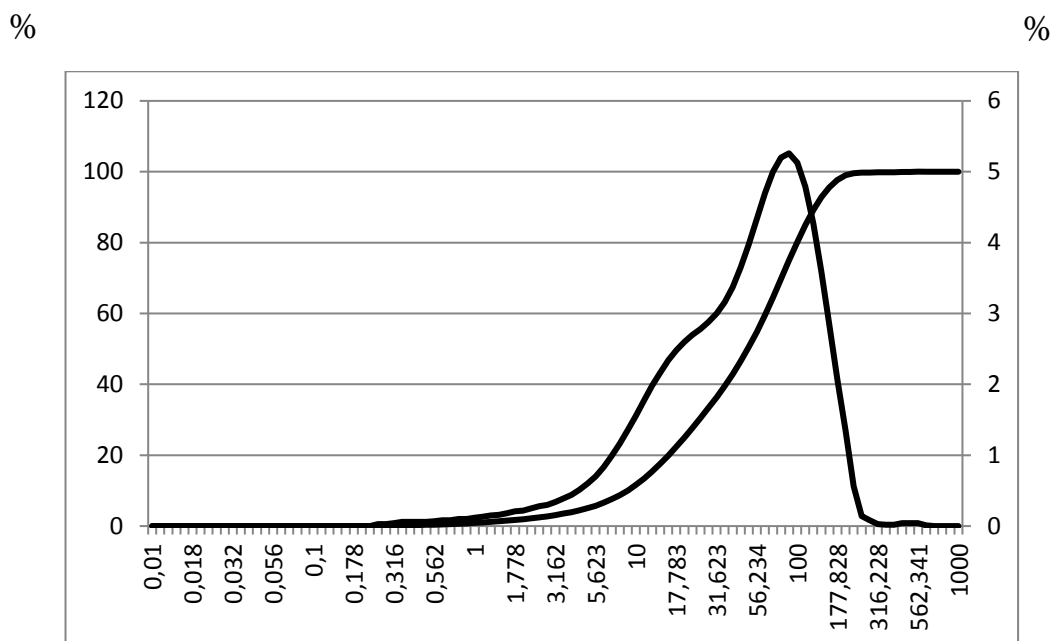


Рисунок 5.2 – Розподіл за класом частинок ТЗП після подрібнення на протязі 4 хв у помольній камері відцентрового млина

З рисунку 5.2 видно, що після подрібнення в продовж 4 хв основна маса матеріалу знаходиться у діапазоні розміру частинок від 0 до 100 мкм, таким чином спостерігається знижені інтенсивності процесу подрібнення, а коефіцієнт подрібнення складає 2,2.

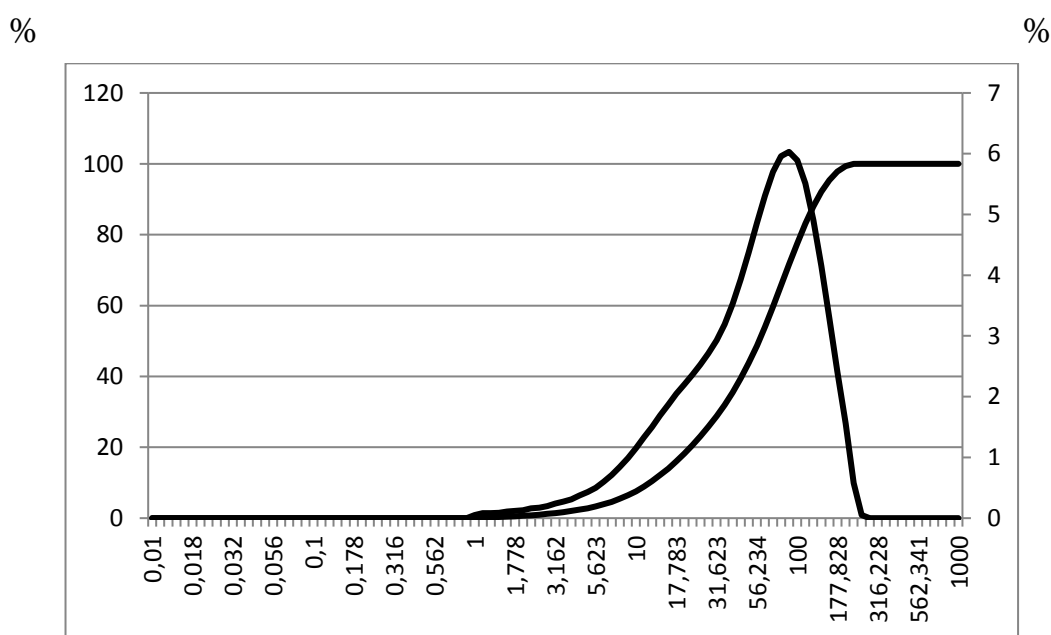


Рисунок 5.3 – Розподіл за класом часток ТЗП після подрібнення на протязі 6 хв у помольній камері відцентрового млина

Як видно з рисунку 5.3 в помольній камері зниження середнього діаметру частинок подрібненого ТЗП призупиняється і після подрібнення від 4 до 6 хв коефіцієнт подрібнення складає 1,4 це можна пояснити тим, що новоутворені частинки класу 10 мкм та нижче видаляються з млина з потоком транспортуючого повітря.

Для визначення ефективності подрібнювання матеріалу був проведений аналіз гранулометричного складу вихідного матеріалу у циклоні та рукавному фільтрі рисунок 5.4 та рисунок 5.5, відповідно.

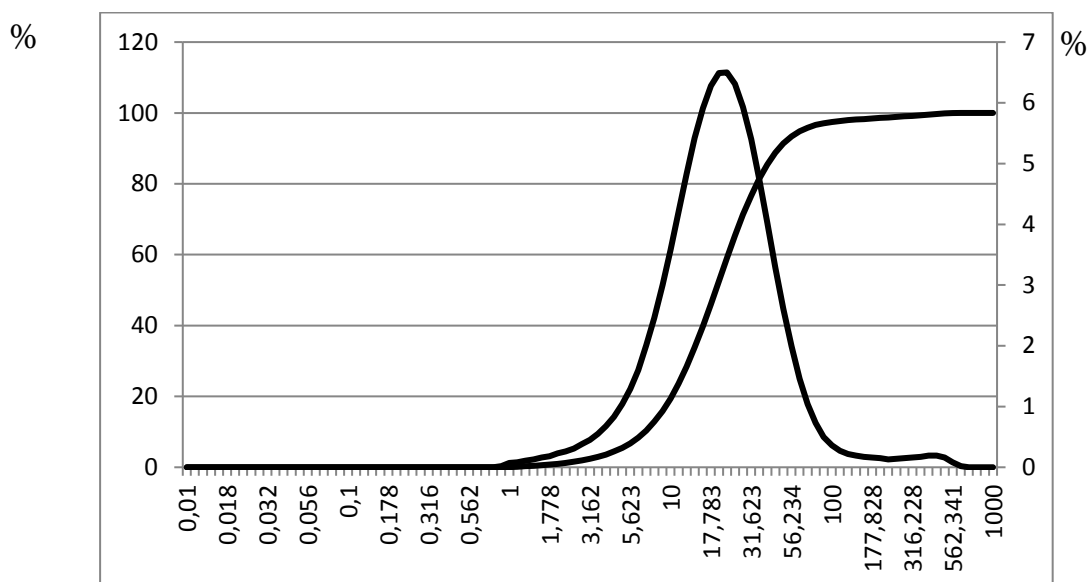


Рисунок 5.4 – Розподіл за класом часток ТЗП у циклоні

З рисунку 5.4 видно, що у циклоні осідає матеріал переважно розміром менше 56 мкм, а середній діаметр складає 15,6 мкм. Це дає підстави стверджувати, що млин при частоті обертання 3850 об./хв та ступеня заповнення камери 0,3 видає на виході частинки розміром менше 56 мкм.

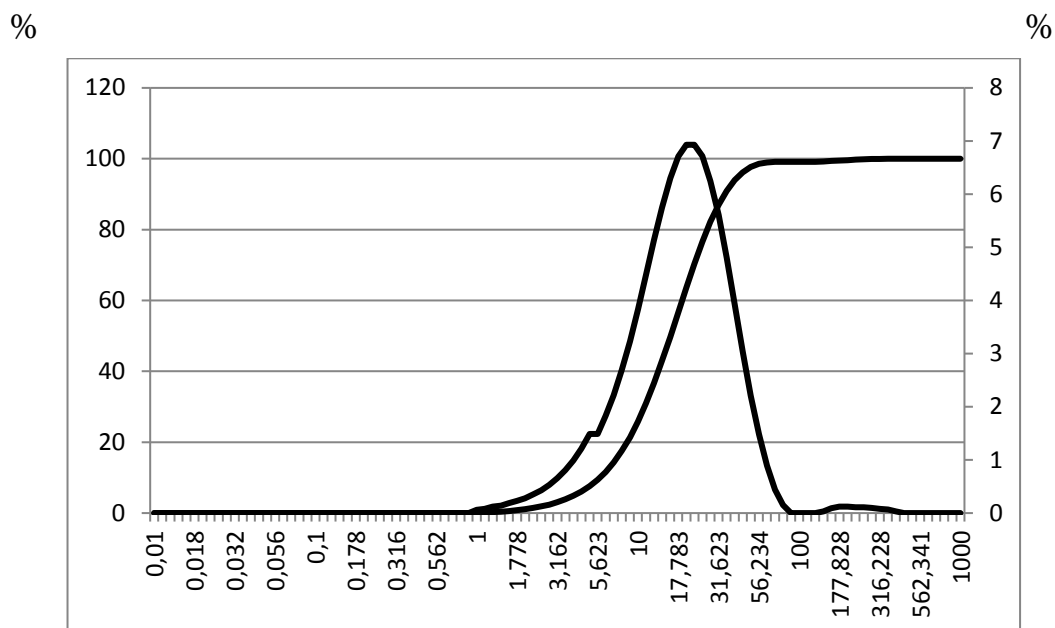


Рисунок 5.5 – Розподіл за класом частинок ТЗП у рукавному фільтрі

Як показано на рисунку 5.5 у рукавному фільтрі 75 % частинки менше 30 мкм, а середній діаметр складає 9,8 мкм. Таким чином на виході відцентрового млина при неперервному процесі подрібнення та частоті обертання вала млина 3850 об./хв, та ступеня заповнення камери 0,25 отримуємо матеріал з середнім діаметром частинок 9,8 мкм.

5.2 Визначення дисперсності твердого залишку піролізу методами електронної мікроскопії

Для підтвердження результатів лазерно-дифракційного аналізу було проведено дослідження подрібненого ТЗП у растровому електронному мікроскопі РЕМ-106І, зображення отримано в режимі роботи у вторинних електронах, граничний залишковий тиск у колоні мікроскопу (в області гармати) не більше $6,7 \cdot 10^{-4}$ Па ($5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.), струм гармати 96 мА.

Фото подрібненого ТЗП після відцентрового млина, що осіло в циклоні представлено на рисунку 5.6.

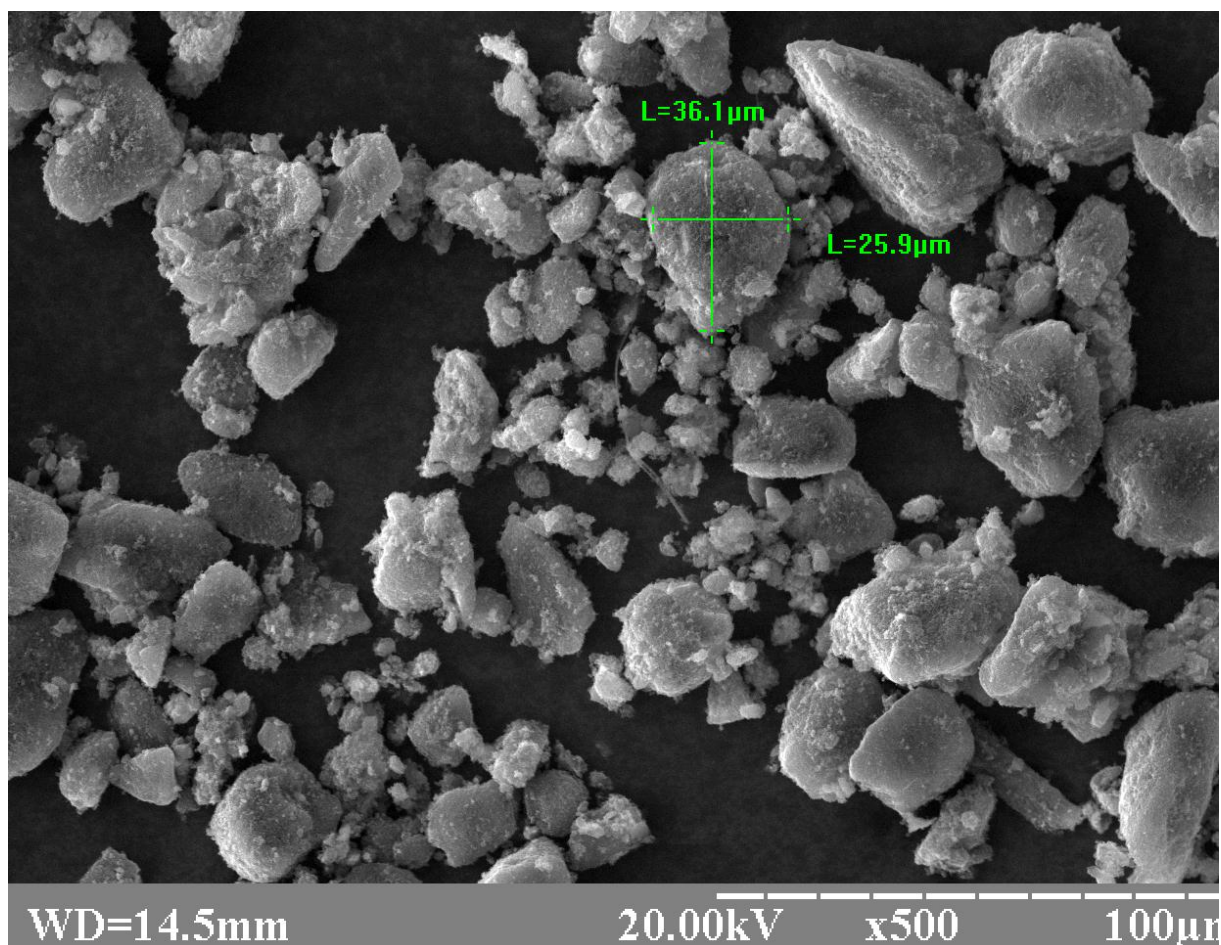


Рисунок 5.6 – Фото з електронного мікроскопа подрібненого матеріалу з циклону

Як видно з рисунку 5.6 через добу після подрібнення спостерігається агломерація ТЗП і в результаті це призводить до того, що під час лазерно-дифракційного аналізу розміри частинок завищуються. На рисунку видно, що в матеріалі присутні частки розміром 30-40 мкм, але деякі частинки такого розміру складаються з більш дисперсних складових.

На рисунку 5.7 представлені результати аналізу на мікроскопі подрібненого ТЗП з рукавного фільтра.

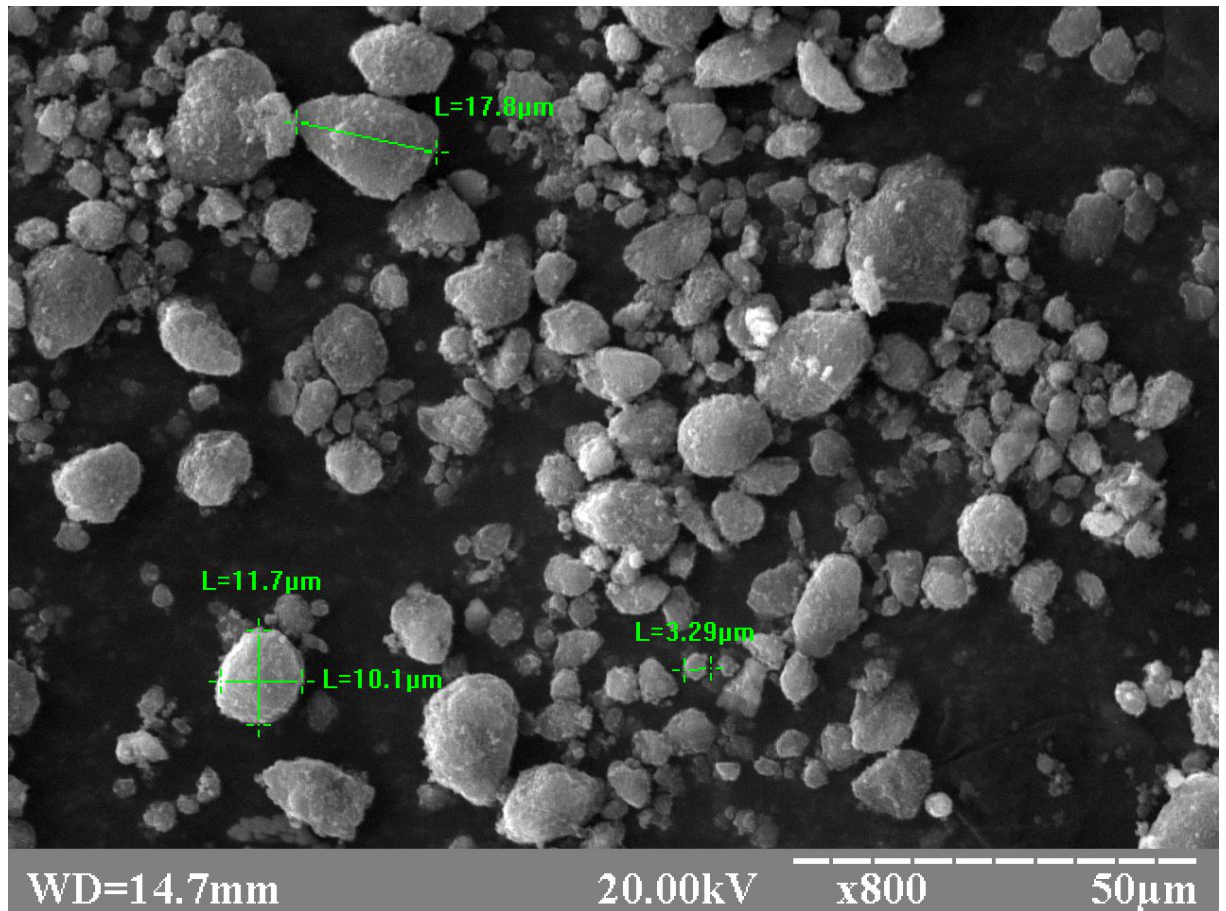


Рисунок 5.7 – Фото з електронного мікроскопа подрібненого матеріалу з рукавного фільтра

Як видно з рисунку найбільша частинка матеріалу складає 17.8 мкм, найменша має розмір менше 1 мкм, агломератів не видно оскільки матеріал підлягав аналізу відразу після подрібнення.

Для отримання графічної залежності розподілу частинок матеріалу по класам була проведена обробка фото з електронного мікроскопу за допомогою нанесення сітки та програмного і ручного підрахунку кількості частинок матеріалу певного розміру.

В результаті підрахунку та обробки результатів отримано криву розподілу матеріалів по класам рисунок 5.8.

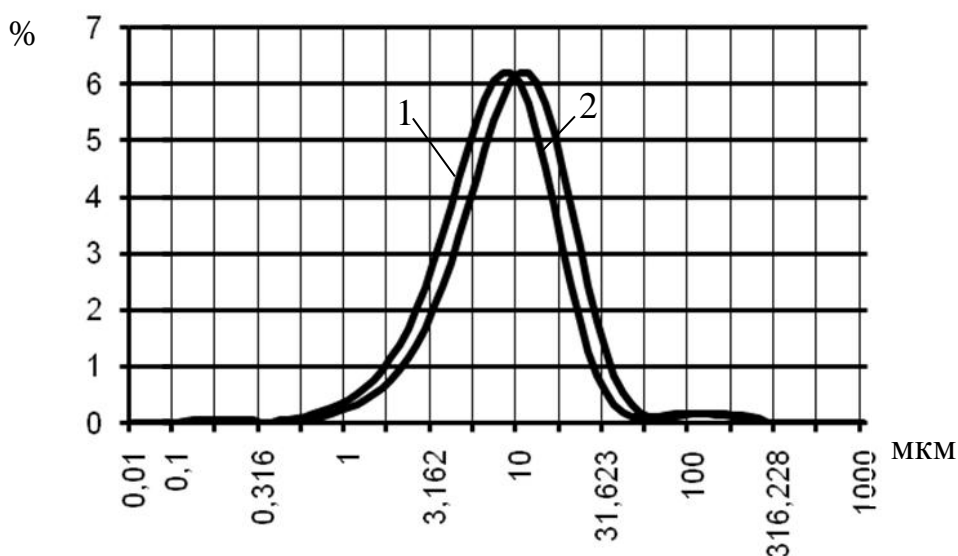


Рисунок 5.8 – Грансклад подрібненого ТЗП визначений методом електронної мікроскопії: 1 –циклон, 2 – рукавний фільтр

У результаті ручного підрахунку частинок отримали, що середній діаметр подрібненого матеріалу в циклоні складає 12 мкм, а в рукавному фільтрі 8 мкм. Відмінність результатів від ЛДА може бути пояснено агломерацією, що відбулась за період від подрібнення до ЛДА на підприємстві.

5.3 Закономірності процесу подрібнення твердого залишку піролізу у відцентровому млині

Вихідним матеріалом для подрібнення був твердий залишок піролізу зношених автомобільних шин попередньо відділений від металевого кордуну з розміром частин 25-40 мм. Гранулометричний склад подрібненого продукту піролізу зношених шин визначався лазерно-дифракційним методом, та методом електронної мікроскопії. Гранулометричний склад подрібненого ТЗП у відцентровому млині представлений на рисунку 5.8 [104].

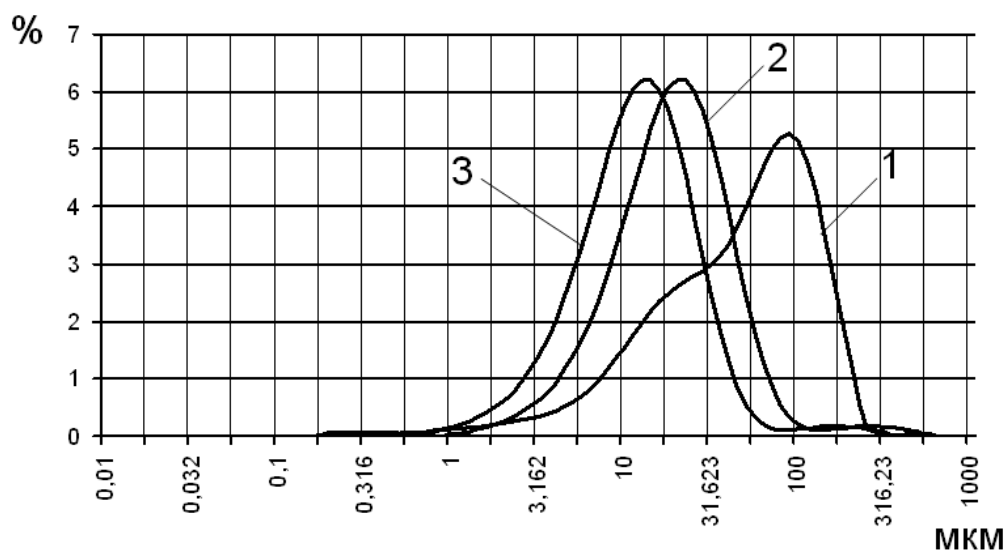


Рисунок 5.9 – Зміна гранскладу ТЗП у відцентровому млині під час подрібнення: 1, 2, 3 – дві, чотири та шість хвилини подрібнення відповідно.

Загальна формула кінетики подрібнення має вигляд:

$$R_x(t) = R_{100-x} k_0^{t^m} \quad (5.1)$$

де R_x – кількість класу крупнішого за заданий, %; R_{100-x} – кількість класу крупнішого за заданий у вихідному матеріалі, %; k_0 – константа, що характеризує відносну швидкість подрібнення; m – параметр, що характеризує зміну відносної швидкості подрібнення; t – час подрібнення, хв.

Розглянемо випадок, коли цільовими класами будуть продукти подрібнення твердого залишку піролізу з розмірами часток рівних і менше 10 мкм. При цільовому класі 10 мкм, значення констант у рівнянні будуть наступні: $R_{100-x} = 100$ (%); $k_0 = 0,897$; $m = 0,59$. Для інших цільових класів значення констант наведено у таблиця 5.1.

Таблиця 5.1

Значення кінетичних параметрів для різних класів продукті подрібнення ТЗП у відцентровому млині

Клас, мкм	R_{100-x} , %	k_0	m
≤ 10 мкм	100	0,897	0,59
≤ 40 мкм	100	0,69	0,39
≤ 70 мкм	100	0,58	0,33
≤ 100 мкм	100	0,43	0,27

Криві, що відображають кінетику подрібнення у відцентровому млині та роторному апараті для класу менше 10 мкм наведені на рисунку 5.10.

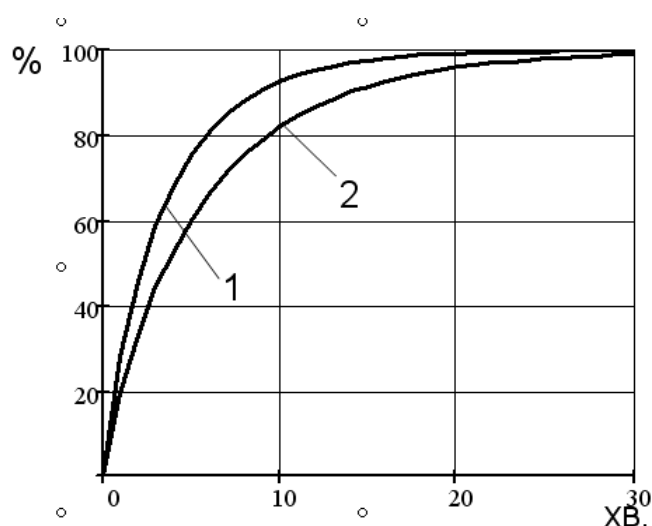


Рисунок 5.10 – Кінетичні залежності подрібнення ТЗП для класу 10 мкм: 1 – у роторному апараті, 2 – у відцентровому млині.

З аналізу рисунку видно, що для досягнення порядку 90% готового продукту класу менше 10 мкм необхідно подрібнювати у відцентровому млині на протязі 9 хв. Також з кінетичних залежностей видно, що найбільш доцільним є неперервний процес подрібнення з видаленням готового класу з зони подрібнення. При заданому класі в 10 мкм концентрація готового класу в матеріалі не повинна перевищувати 52 %.

5.4 Твердий залишок піролізу як наповнювача гумових виробів

У гумовій промисловості одним з основних наповнювачів еластомерів є технічний вуглець. Цей інгредієнт є цінним і водночас дорогим, оскільки сировиною для його отримання виступають енергоносії (паливо та газ). Тому пошук альтернативних наповнювачів гумотехнічних виробів не втрачає своєї актуальності.

У роботі обґрунтована ефективність подрібнення твердого залишку піролізу (ТЗП) у відцентрових млинах та запропоновано відцентровий млин з енергозберігаючим робочим органом [105]. У роботах [106-107] показана ефективність використання ТЗП як наповнювача гумотехнічних виробів. У той же час недостатньо досліджено вплив дисперсності подрібненого ТЗП на фізико-механічні властивості гуми та відсутні дослідження по ефективності застосування ТЗП в рецептурах конкретних промислових гумових виробів.

Мета даного розділу визначити вплив дисперсності подрібненого ТЗП на фізико-механічні властивості гуми та ефективність використання ТЗП як наповнювача гумотехнічних виробів в умовах ТОВ "Інтер-ГТВ".

Загальними критеріями якості технічного вуглецю як наповнювача є їх структурність, зольність, йодне число та питома умовна поверхня. Дані критерії характеризують дисперсність, поверхневу активність та чистоту наповнювача. Вихідні зразки бралися після подрібнення в лабораторному відцентровому млині з помольної камери, циклону та рукавного фільтру.

Результати визначення показників структурності подрібненого твердого залишку піролізу, що є вихідними зразками для дослідження представлені на рисунку 5.11.

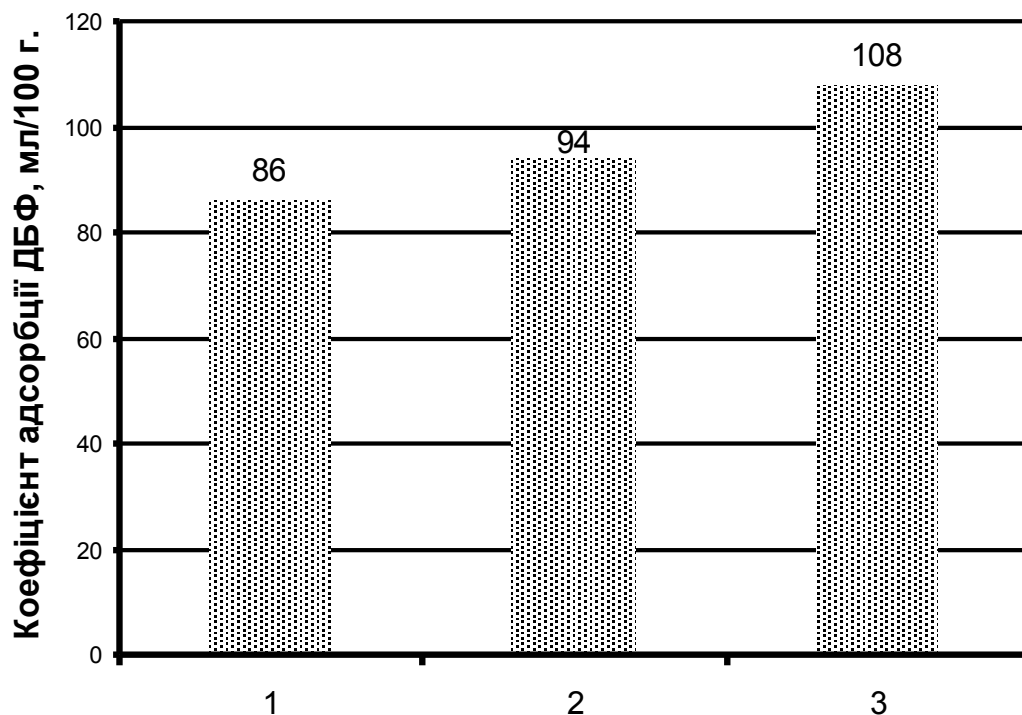


Рисунок 5.11 – Показник структурності подрібненого ТЗП; 1 – помольна камера; 2 – циклон; 3 – рукавний фільтр

Як видно з рисунку 5.11 значення показника структурності після класифікації в циклоні і рукавному фільтрі збільшується з 86 до 108 мл/100 г, що може бути пояснено більшою дисперсністю подрібненого матеріалу, а відповідно і більшою поверхневою активністю. Попереднє випробування подрібненого ТЗП як наповнювача гуми виконали на гумових сумішах рецептури таблиця 5.2.

Отримані зразки гуми піддавалися випробуванням, у процесі яких визначалися наступні їх фізико-механічні показники: твердість, еластичність, опір розриву, опір роздеру, а також термічне старіння. Еластичність відновлення гумової суміші з ТЗП представлені на рисунку 5.11. Результати випробування умовного напруження досліджуваних гум при 300 % подовженні за нормальних умов і після термічного старіння представлені на рисунку 5.12, відносно подовження в момент розриву досліджуваних гум за нормальних умов і після старіння на рисунку 5.12 [106-107].

Таблиця 5.2

Рецептура експериментальної гумової суміші

Найменування інгредієнту Частка інгредієнта в суміші	Мас. ч. на 100 мас. ч. каучуку			
	1	2	3	4
Каучук СКМС-30АРКМ-15	100	100	100	100
Стеаринова кислота	2	2	2	2
Білила цинкові	5	5	5	5
Сірка	2	2	2	2
Альтакс	3	3	3	3
ТЗП в помольній камері	40			
ТЗП в циклоні		40		
ТЗП в рукавному фільтрі			40	
ТВ П 803				40

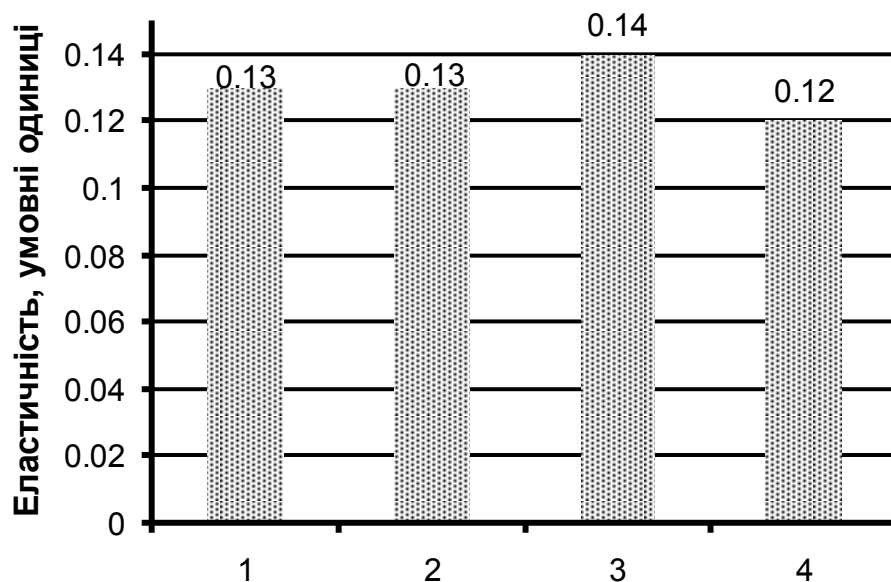


Рисунок 5.12 – Відносне еластичне подовження гуми: 1,2,3 – подрібнений ТЗП з помольної камери, циклону та рукавного фільтру відповідно; 4 – технічний вуглець П 803.

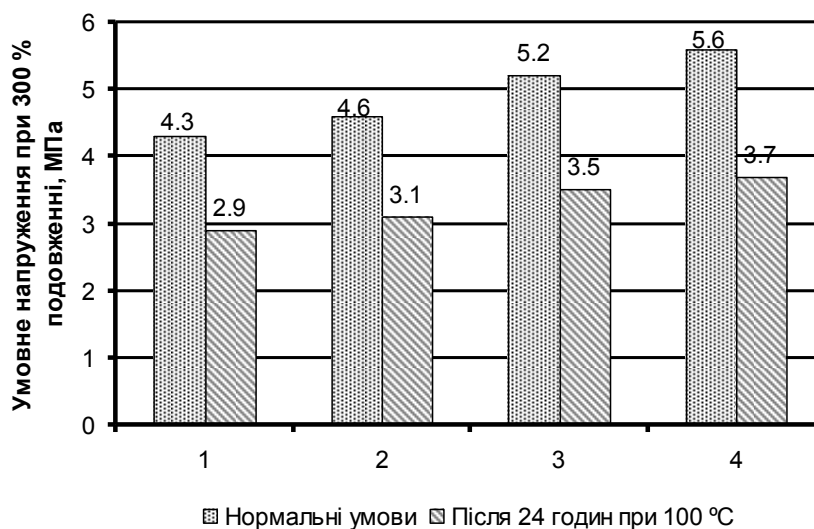


Рисунок 5.13 – Умовне напруження досліджуваних гум при 300 % подовження: 1,2,3 – подрібнений ТЗП з помольної камери, циклону та рукавного фільтру відповідно; 4 – технічний вуглець П 803.

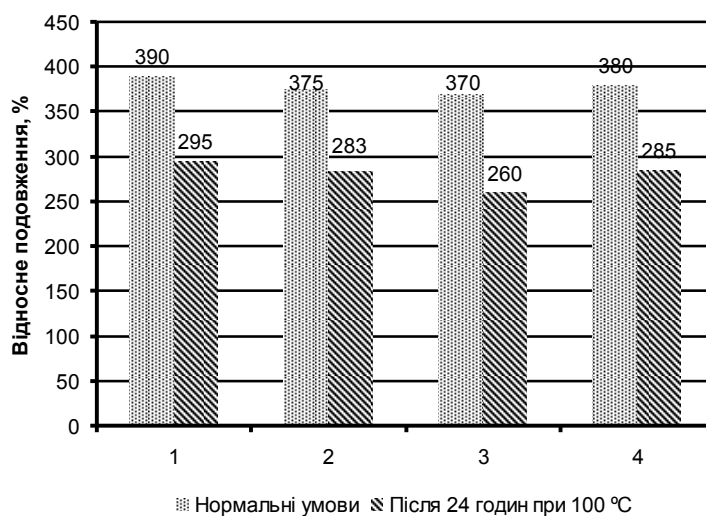


Рисунок 5.14– Відносне подовження в момент розриву гумового зразка при нормальних умовах і після термічного старіння: 1,2,3 – подрібнений ТЗП з помольної камери, циклону та рукавного фільтру відповідно; 4 – технічний вуглець П 803.

Аналіз діаграм рисунок 5.11 і рисунок 5.12 показав, що умовне напруження при подовженні на 300 % при використанні подрібненого ТЗП з циклону та рукавного фільтру збільшується з 4,3 до 5,2 МПа. Що стосується відносного

подовження, то по цьому параметру гума виготовлена із застосуванням подрібненого ТЗП з вищою крупністю (помольна камера) на 20 % перевершує гуму виготовлену з наповнювачем меншою крупністю (рукавний фільтр).

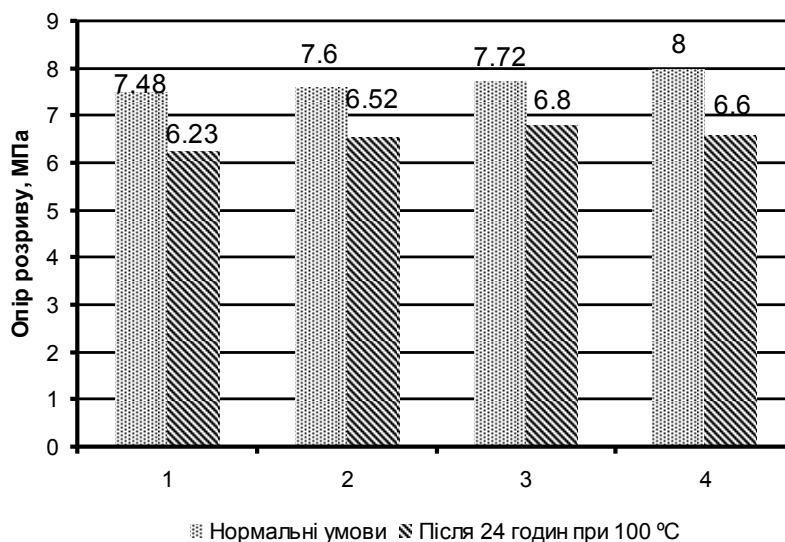


Рисунок 5.15 – Умовний опір розриву досліджуваних зразків: 1,2,3 – подрібнений ТЗП з помольної камери, циклону та рукавного фільтру відповідно; 4 – технічний вуглець П 803.

Опір роздеру випробовуваних гум представлено на рисунку 5.16.

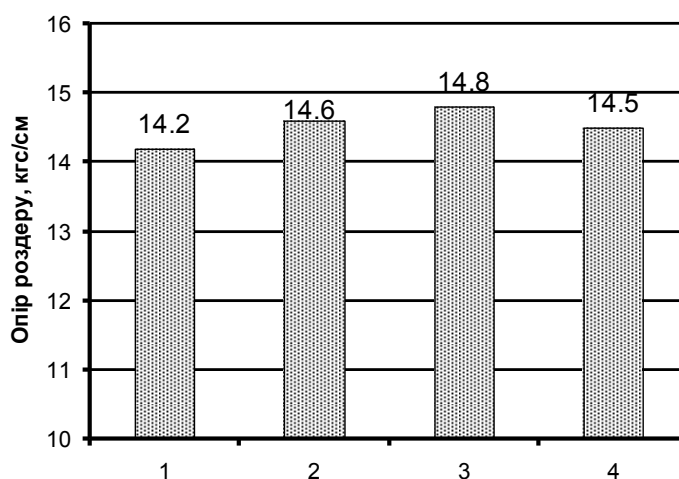


Рисунок 5.16 – Опір роздеру випробовуваних гум: 1,2,3 – подрібнений ТЗП з помольної камери, циклону та рукавного фільтру відповідно; 4 – технічний вуглець П 803

З рисунку 5.15 і рисунку 5.16 видно, що по умовному опору розриву гума виготовлена з використанням подрібненого ТЗП різного ступеня дисперсності відрізняється на 0,24 МПа, а по опору роздеру лише на 0,6 кгс/см².

Оскільки було визначено, що по своїм фізико-хімічним характеристикам ТЗП подрібнений у відцентровому млині має найкращі показники, то випробуємо його як наповнювач у промисловому виробництві. Відцентровий млин (ВМ) призначений для подрібнення неабразивних м'яких матеріалів (таких як твердий залишок піролізу) з мінімальними питомими енерговитратами. Для випробування були узяті два зразки: ТОП 1 – продукт на виході з ВМ уловлений рукавним фільтром; ТОП 2 – продукт подрібнення піролізу, що залишився в помольній камері.

Дані наповнювачі випробувані згідно ГОСТ 7885–86 (таблиця результатів випробування (таблиця 5.3). Виготовлено три варіанти гумової суміші РП-101 із застосуванням вибраних зразків:

- 1) повна заміна технічного вуглецю П-803 на ТЗП1;
- 2) співвідношення П-803:ТЗП1 – 50:50
- 3) співвідношення П-803:ТЗП2 – 50:50

Гумові суміші РП-101 випробувані згідно ДСТУ 2805-94 (таблиця результатів випробувань (таблиця 5.4).

Таблиця 5.3

Характеристики наповнювачів

№ п/п	Найменування показника	Норма відповідно НД	Фактично отримані результати	
			ТЗП1	ТЗП2
1	2	3	4	5
1	Питома умовна поверхня, м ² /г	14-18	7,4	6,5
2	Масова частка втрат, %	не більше 0,5	0,87	0,73
3	Масова частка залишків на ситі 014, %	не більше 0,01	3,4	40,8
4	рН водяної суспензії	7,0-9,0	-	-

Таблиця 5.4

Фізико-механічні параметри гум при різних наповнювачах

№ п/п	Найменування показника	Норми відповідно НД	Фактично отримані результати		
			ТЗП1	ТЗП1 (50:50)	ТЗП2 (50:50)
1	- умовна міцність при розтягненні, МПа, не менше	7,3	5,0	5,6	3,7
2	- відносне подовження при розриві, %, не менше	200	444	322	370
3	- відносне остаточне подовження після розриву, %	-	16	12	12
4	- твердість по Шору А, умовні одиниці, не менше	57	50	57	52
5	- питомий об'ємний опір, Ом м, не менше	10^9	$3,3 \cdot 10^{13}$	$9,5 \cdot 10^{12}$	$1,5 \cdot 10^{13}$

5.5 Твердий залишок піролізу як добавка до керамічної маси

Як відомо твердий залишок піролізу (ТЗП) зношених автомобільних шин на 80–87 % складається з вуглецю, тому є цінним високо-енергетичним компонентом та може бути використано у різних технологіях, зокрема при виробництві керамічних виробів. Даний технологічний продукт введений у керамічну масу в процесі випалу буде виконувати функції внутрішнього теплоносія та опріснювача при формовці виробів. Отже використання твердого залишку піролізу як добавки до керамічної маси може вирішувати задачу утилізації подрібненого ТЗП з високою зольністю.

В рамках даної роботи поставлена мета визначення доцільності використання твердого залишку піролізу та раціональну його кількість у керамічних сумішах, а також дослідити його вплив на властивості отриманих керамічних виробів.

Цикл подрібнення ТЗП, призводить до підвищення зольності матеріалу, що залишається у циклоні, оскільки частинки золи при рівній з вуглецем дисперсності

є важчими. Використання в гумі наповнювача з зольністю, що перевищує 10 %, недопустимо. Тому, цікавим з точки зору можливого використання подрібненого ТЗП з підвищеним вмістом золи є його добавка до керамічних мас. Зважаючи на це було проведено серію випробування керамічних зразків з вмістом подрібненого ТЗП (від 0 до 10%) з середнім діаметром часток $d_{cp} = 46$ мкм. Графік результату випробувань представлений на рисунку 5.8 [7].

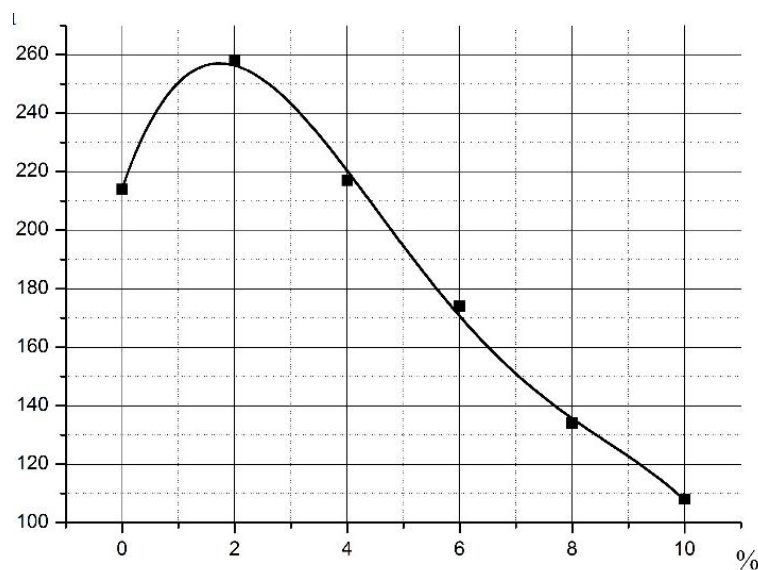


Рисунок 5.17 – Залежність міцності керамічних зразків від кількості наповнювача ТЗП при температурі випалу 1050 °C

Оскільки було отримано, що керамічні зразки виготовлені без наповнювача мають пік міцності при температурі випалу 1050 °C, отже для даного складу маси, це є температура спікання.

У випадку коли до керамічної маси додається 2% подрібненої вигоряючої домішки твердого залишку піролізу, міцність керамічного зразка суттєво підвищується, але не спостерігається явно вираженого піку. Досягнутий показник міцності при 1050 °C на 6 кг/см² нижче ніж при 1100 °C, це дає підстави припустити, що з подальшим підвищенням температури міцність керамічного зразка залишається незмінною.

При введенні 4 мас.% добавки, характеристика зміни міцності керамічного зразку практично ідентична показникам вихідного зразку.

При подальшому збільшенні концентрації (6, 8, 10 мас.%) вигоряючої домішки спостерігається поступове зниження міцності, що пов'язано з розпушенням структури керамічної маси.

Випробування показали, що у результаті випалу ТЗП вигорає повністю і не впливає на відтінок отриманого керамічного виробу.

Випробування показали, що при температурі випалу ТЗП вигорає повністю і не впливає на відтінок отриманого керамічного виробу рисунок 5.18.



Рисунок 5.18 Зовнішній вигляд зразків до і після випалу

5.6 Методика визначення основних параметрів відцентрового млина при проектуванні на задану продуктивність

Вищерозглянутий млин є модельним, тобто млином на якому проводилися випробування і визначалися його раціональні параметри та закономірності процесу подрібнення ТЗП до класу менше 10 мкм. Продуктивність модельного млина становить 327 кг на добу. Для визначення основних параметрів відцентрового млина із заданою продуктивністю, який надалі будемо називати натурним, скористаємося методами теорії подібності.

Введемо наступні критерії подібності:

Геометрична подібність. При виборі геометричного коефіцієнта використовуємо геометричну подібність, яка передбачає подібність геометричних розмірів і кутів відцентрових млинів.

Динамічна подібність. Динамічна подібність передбачає рівність відцентрових сил, що діють на матеріал в модельному та натурному млинах. Ця умова буде діяти при рівних відцентрових прискореннях.

На основі критеріїв подібності отримаємо рівняння подібності. В якості модельного млина будемо розглядати лабораторний млин, а за натурний – млин, що проектується. При цьому коефіцієнт геометричної подібності дорівнює

$$k_{г.п.} = \frac{D_H}{D_M} = \frac{H_H}{H_M} = \frac{l_H}{l_M} = \frac{h_H}{h_M} = \frac{b_H}{b_M}, \quad (5.2)$$

де D_H, H_H, l_H, h_H, b_H – діаметр і висота помольної камери, довжина висота та товщина робочого органу натурального млина; D_M, H_M, l_M, h_M, b_M – діаметр і висота помольної камери, довжина висота та товщина робочого органу модельного відцентрового млина.

З критерію динамічної подібності отримуємо рівняння динамічної подібності

$$\omega_M^2 \cdot l_M = \omega_H^2 \cdot l_H. \quad (5.3)$$

Тоді, коефіцієнт динамічної подібності дорівнює

$$k_{д.п.} = \frac{\omega_H^2}{\omega_M^2} = \frac{l_M}{l_H}. \quad (5.4)$$

Припускаючи, що відношення продуктивності натурального і модельного млинів пропорційно відношенню об'ємів матеріалу у млинах дістанемо

$$\frac{Q_H}{Q_M} = \frac{V_{(M)H}}{V_{(M)M}}, \quad (5.5)$$

де Q_H , $V_{(M)H}$ – продуктивність та об'єм матеріалу у натурному млині; Q_M , $V_{(M)M}$ – продуктивність та об'єм матеріалу у модельному млині.

При цьому об'єм матеріалу у помольних камерах натурального і модельного млинів визначаються за формулами:

$$V_{(M)H} = r \cdot \frac{\pi \cdot D_H^2}{4} \cdot H_H, \quad (5.6)$$

$$V_{(M)M} = r \cdot \frac{\pi \cdot D_M^2}{4} \cdot H_M, \quad (5.7)$$

де r – відношення об'єму матеріалу до об'єму камери, є сталою величиною і складає 0,27.

Із залежностей (5.5), (5.6), (5.7) витікає, що відношення продуктивності натурального млина до продуктивності модельного млина має наступну залежність від геометричних параметрів помольної камери

$$\frac{Q_H}{Q_M} = \frac{D_H^2 \cdot H_H}{D_M^2 \cdot H_M}. \quad (5.8)$$

Враховуючи, що висота циліндричної помольної камери дорівнює її діаметру, то отримаємо формулу для визначення діаметру помольної камери натурального млина при заданій продуктивності

$$D_H = D_M \cdot \sqrt[3]{\frac{Q_H}{Q_M}}. \quad (5.9)$$

З рівняння (5.2) та (5.9) отримуємо формулу для визначення кутової швидкості робочого органу натурального відцентрового млина

$$\omega_H = \omega_M \cdot \sqrt{\frac{D_M}{D_H}} = \omega_M \cdot \sqrt{\frac{1}{k_{2.n.}}} \quad (5.10)$$

Визначення потужності двигуна. Для визначення орієнтовної потужності двигуна при проектуванні на задану продуктивність розглянемо формулу (3.26), що була отримана для модельного зразку відцентрового млина. При проектуванні натурального млина в цій формулі змінюється параметр A_0 , що характеризує геометрію робочого органу та кутову швидкість з ω_M на ω_H . Для визначення залежності A_0 від діаметру помольної камери D було проведено аналітичне дослідження та отримано лінійну залежність рисунок 5.19.

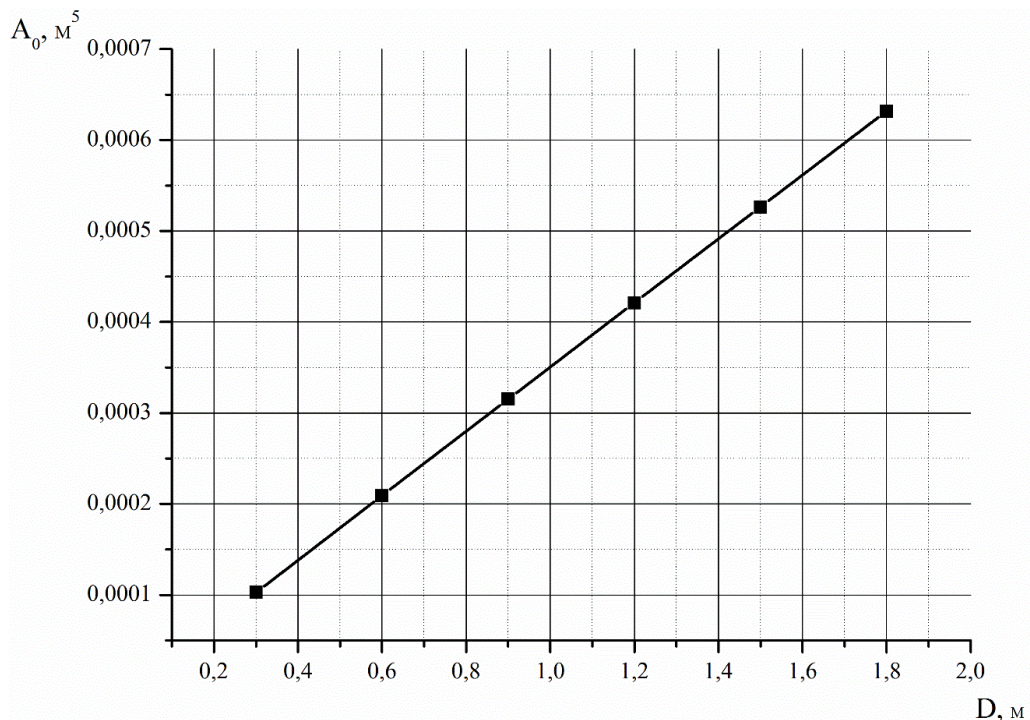


Рисунок 5.19 – Залежність A_0 від діаметру помольної камери

Таким чином було отримано залежність геометричних параметрів робочого органу від діаметру помольної камери у вигляді

$$A_0(D) = \chi \cdot D, \quad (5.11)$$

де χ – безрозмірний коефіцієнт, що складає $3,42 \cdot 10^{-4}$.

Отже враховуючи формули (3.26), (5.9) та (5.10) отримаємо залежність споживаної потужності млина від діаметру помольної камери у вигляді

$$N = 36.48 \cdot \chi \cdot \rho_{cp} \cdot d_{cp}^{0.3} \cdot \omega_M \cdot \sqrt{D_M \cdot D_H}. \quad (5.12)$$

Деякі основні параметри натурального відцентрового млина для різних значень продуктивності наведено у таблиця 5.5.

Таблиця 5.5

Основні параметри відцентрового млина в залежності від продуктивності

№ п/ п	Продуктивність, тонн/добу	Діаметр помольної камери, м	Кутова швидкість робочого органу, с ⁻¹	Споживана потужність, кВт
1	3	0,63	261	7,873
2	5	0,74	240	8,532
3	10	0,94	214	9,617
4	15	1,08	199	10,308
5	20	1,18	190	10,775

5.7 Висновки

1. В результаті проведення дослідницької роботи отримано залежності зміни гранулометричного складу твердого залишку піролізу зношених шин під час подрібнення у відцентровому млині.

2. Отримано значення констант рівняння кінетики подрібнення твердого залишку піролізу у відцентровому млині для класу менше 10 мкм.

3. З кінетичних залежностей видно, що найбільш доцільним є неперервний процес подрібнення з видаленням готового класу менше 10 мкм, при його концентрації в помольній камері на рівні не більше 52 %.

4. Дослідження на модельній рецептурі показали залежність якості гумових виробів від ступеня дисперсності подрібненого ТЗП, та яскраво виражену нелінійну залежність показників якості гуми від середнього діаметру частинок наповнювача.

5. При підвищенні дисперсності часток ТЗП від середнього діаметра 63 мкм до 11 мкм спостерігається, що еластичність та опір розриву практично не залежить від дисперсності наповнювача; умовне напруження та опір роздеру має нелінійну зворотну залежність; відносне подовження пряму нелінійну залежність.

6. По такому показнику як опір роздеру гума з наповнювачем ТЗП навіть при дисперсності 21 мкм перевищують гуму з наповнювачем П 803.

7. Стовідсоткова заміна наповнювача П 803 на подрібнений ТЗП в суміші, що призначена для виготовлення гумових прокладок рейкових шляхів, призводить до зниження від норми на 31 % тільки одного показника – умовної міцності, в той час як всі інші показники покращуються.

8. Випробувані суміші, виготовлені на основі подрібненого ТЗП зношених шин і технічного вуглецю П-803 показали, що при співвідношенні ТЗП : П-803 – 1:1 на відміну від використання як наповнювача лише ТЗП умовна міцність підвищується на 12%, в той же час спостерігається зниження питомого об'ємного опору в 3,3 разів, та відносного подовження при розриві на 27,8 %.

9 Застосування ТЗП з середнім діаметром часток 11 мкм в якості замітника промислового технічного вуглецю П 803, дозволяє суттєво (на чотири порядки) підвищити питомий об'ємний електричний опір гумових виробів.

10. Твердий залишок піролізу може бути використаний як опіснювач при виготовленні керамічних виробів, він дозволить знизити загальну усадку з 6,6% при керамічній масі без домішки, до 3,6% при 10 мас.% доданого твердого залишку піролізу. Оптимальним є використання керамічної суміші з вмістом 2 мас.% подрібненого ТЗП, що дозволить при температурі випалу 1100 °С знизити усадку з 6,6 % до 4,2 % з одночасним підвищенням міцності на 6.57 МПа, та водопоглинання з 0,5% до 1,1 %.

11. Оскільки твердий залишок піролізу при температурі вище 700 °С повністю згорає, випалені керамічні зразки зберігають свій природній колір і відтінок, що є важливою властивістю при виготовленні керамічної цегли.

12. Подрібнений твердий залишок піролізу раціонально використовувати в кількості 2 – 4 мас.% при виробництві цегли, як вигоряючу домішку, для енергозбереження та підвищення міцності керамічних виробів.

Перлік посилань

104. **Осташко, І.О.** Кінетика процесу подрібнення твердого залишку піролізу зношених автомобільних шин / І.О. Осташко, Б.В. Виноградов // Тези доповід. 5 Між народ. науково-технічн. Конф. „Хімія і сучасні технології”. Т.1. Дніпропетр.-2011. 20 – 22 квітня. с.36

105. Виноградов, Б.В. Повышение эффективности применения твердого остатка пиролиза изношенных шин в качестве наполнителя эластомерных материалов. / Б.В. Виноградов, Ю.Н. Ващенко, **И.А. Осташко**, В.И. Емельяненко // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – №1. – С. 199-202.

106. Осташко, И.А. Твердый остаток пиролиза как наполнитель резиновых прокладок рельсовых путей / И.А. Осташко, Б.В. Виноградов, Ю.Н. Ващенко //

Промышленное производство и использование эластомеров – 2013. – №1. – С. 29-32.

107. Виноградов Б.В. Повышение эффективности применения твердого остатка пиролиза изношенных шин в качестве наполнителя эластомерных материалов / Б.В. Виноградов, Ю.Н. Ващенко И.А. **Осташко**, **В.И.** Емельяненко // I Международная научно-практическая конференция и научно-техническая выставка-форум: «Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии. Проблемы и перспективы» тезисы (Одесса 28 сентября – 2 октября 2009) – с. 41-42

108. Виноградов, Б.В. Измельченный твердый остаток пиролиза как наполнитель эластомерных материалов. / Б.В. Виноградов, Ю.Н. Ващенко, **И.А. Осташко**, В.И. Шувалова // Эластомеры: материалы, технология, оборудование, изделия, тез. докл. 8-я Украинская с международным участием научно-техническая конференция резинщиков –Дн-ск, 2010. – С. 117-120.

109. Пат. 108288 С Україна, С08L 9/06, С08L 17/00. Гумова суміш для виготовлення нащпальних прокладок / **Осташко І.О.**, Виноградов Б.В., Ващенко Ю.М., Гірін О.Б.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” - № а201309488; заявл. 29.07.2013; опубл. 25.04.2014; Бюл.№ 8

110. **Осташко І.О.** Твердий залишок піролізу як енергозберігаюча добавка в технології будівельної кераміки / **І.О. Осташко**, Б.В. Виноградов, В.В. Коледа // Вістник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 59. – С. 80-85.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз літературних даних, показана перспективність використання твердого залишку піролізу як технічний вуглець, обрано перспективне розмільне обладнання.

2. Проведено дослідження лабораторних зразків розмільного обладнання, визначено питомі енерговитрати на процес подрібнення ТЗП та можливі значення коефіцієнту ДБФ, що досягаються різними способами подрібнення. Обґрунтовано доцільність використання відцентрового млина для подрібнення ТЗП.

3. Запропоновано конструкційні параметри робочого органу і млина в цілому, що забезпечують мінімальні питомі енерговитрати на подрібнення матеріалу. Отримано формулу для визначення споживаної потужності робочим органом відцентрового млина під час подрібнювання твердих залишків піролізу зношених автомобільних шин. Встановлено, що споживана потужність у процесі подрібнення лінійно залежить від частоти його обертання, та пропорційна середній крупності твердих частинок, в ступені 0,3.

4. У разі підвищення дисперсності частинок ТЗП від середнього діаметра 63 мкм до 9 мкм спостерігається, що еластичність та опір розриву модельних гум практично не залежить від дисперсності наповнювача; умовне напруження та опір роздиранню має нелінійну зворотну залежність; відносне подовження пряму нелінійну залежність.

5. Випробувано суміші для нашпальних прокладок рейкових шляхів, в умовах ВАТ БЗГТВ, що виготовлено на основі подрібненого ТЗП зношених шин і технічного вуглецю П-803 показали, що для співвідношення ТЗП: П-803 – 1:1 на відміну від використання як наповнювача лише ТЗП умовна міцність підвищується на 12%, в той же час спостерігається зниження питомого об'ємного опору в 3,3 разів, та відносного подовження під час розриву на 27,8 %.

6. Показано, що твердий залишок піролізу може бути використаний як опіснювач для виготовлення керамічних виробів. Це дає змогу знизити загальну усадку з 6,6% при керамічній масі без домішки, до 3,6% при 10 мас.% доданого

твердого залишку піролізу. Оптимальним є використання керамічної суміші з вмістом 2 мас.% подрібненого ТЗП, що дає змогу для температури випалу 1100 °С знизити усадку з 6,6 % до 4,2 % з одночасним підвищенням міцності на 6,57 МПа та водопоглинання з 0,5% до 1,1 %. Показано, що випалені керамічні зразки зберігають свій природній колір і відтінок, що є важливою властивістю для виготовлення керамічної цегли.

ДОДАТОК А

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Виноградов Б. В. Об измельчении твердых остатков пиролиза изношенных автомобильных шин электрогидроимпульсным способом / Б. В. Виноградов, Д. А. Федин, В. И. Емельяненко, **И. А. Осташко** // Вопросы химии и химической технологии. – 2008, № 6. – С. 163–166.
2. Виноградов Б. В. Измельчение твердых остатков процесса пиролиза изношенных автомобильных шин в центробежной мельнице / Б. В. Виноградов, **И. А. Осташко**, В. И. Емельяненко // Вопросы химии и химической технологии №2 2009 С. 159-161.
3. Виноградов Б. В. Об энергетических характеристиках центробежных мельниц с S-образным рабочим органом / Б. В. Виноградов, **И. А. Осташко** // Вісник НТУ «ХП». – 2009. – № 25. – С. 64-69.
4. Виноградов Б. В. Повышение эффективности применения твердого остатка пиролиза изношенных шин в качестве наполнителя эластомерных материалов. / Б. В. Виноградов, Ю. Н. Ващенко, **И. А. Осташко**, В. И. Емельяненко // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – №1. – С. 199-202.
5. **Осташко І. О.** Аналіз міцності S-подібного робочого органу відцентрового млина / **І. О. Осташко** // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – №2. – С. 150-152.
6. Виноградов Б. В. Застосування роторно-імпульсного апарату для диспергування твердого залишку піролізу зношених автомобільних шин / Б. В. Виноградов, **И. А. Осташко** // Вісник НТУ «ХП». – 2010. – № 66. – С. 74-79.
7. **Осташко І. О.** Динаміка механічної системи відцентрового млина / **І. О. Осташко**, Б. В. Виноградов // Вопросы химии и химической технологии. – 2011. – №6. – С. 218-220.

8. **Осташко І. О.** Обґрунтування параметрів робочого органу відцентрового млина / **І. О. Осташко**, Б. В. Виноградов // Вопросы химии и химической технологии. – 2012. – №5 – С. 182–184.

9. **Осташко І. О.** Твердий залишок піролізу як енергозберігаюча добавка в технології будівельної кераміки / **І. О. Осташко**, Б. В. Виноградов, В. В. Коледа // Вістник НТУ «ХП». – 2012. – № 59. – С. 80-85.

Статті у закордонних фахових виданнях:

10. **Осташко И. А.** Твердый остаток пиролиза как наполнитель резиновых прокладок рельсовых путей / **И. А. Осташко**, Б. В. Виноградов, Ю. Н. Ващенко // Промышленное производство и использование эластомеров – 2013. – №1. – С. 29-32.

11. Vinogradov B. Substantiation of key parameters of a centrifugal mill intended for grinding solid residue from the pyrolysis of used automobile tyres / B. V. Vinogradov, **I. O. Ostashko** // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. – 2016, 91, P. 133-141. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858.

12. **Ostashko I. O.** Aeromechanics of processes in the flow part of a centrifugal mill / **I. O. Ostashko**, B. V. Vinogradov // Acta Mechanica Slovaca. – 2017, Vol. 21, №3, P. 51-57. ISSN: 1335-2393.

Патенти України на винахід:

13. Пат. 90631 С Україна, МПК В02С 13/14. Відцентровий млин ударної дії / Виноградов Б. В. Ємельяненко В. І. Осташко І. О.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – №а200905165; заявл. 25.05.2009; опубл. 11.05.2010; Бюл. №9.

14. Пат. 91110 С Україна, МПК В02С 19/18. Пристрій для електрогідроімпульсного подрібнювання / Виноградов Б. В., Ємельяненко В. І. Осташко І. О.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – №а200810262; заявл. 11.08.2008; опубл. 25.06.2010; Бюл. №12.

15. Пат. 106127 С Україна, МПК В02С 13/286, В02С 18/08, В02С 18/22. Відцентровий млин / Гірін О. Б., Виноградов Б. В., Осташко І. О. Ємельяненко В. І.; заявник

та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – № а201212853; заявл. 12.11.2012; опубл. 10.10.2013; Бюл. № 19.

16. Пат. 106773 С Україна, В02С 13/14. Відцентровий млин ударної дії / Гірін О. Б., Виноградов Б. В., Осташко І. О.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – № а201206487; заявл. 29.05.2012; опубл. 27.08.2013; Бюл. № 16.

17. Пат. 106780 С Україна, В02С 13/14. Відцентровий млин / Гірін О. Б., Виноградов Б. В., Осташко І. О., Ємельяненко В. І.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – № а201208908; заявл. 19.07.2012; опубл. 27.08.2013; Бюл. № 16.

18. Пат. 108288 С Україна, С08L 9/06, С08L 17/00. Гумова суміш для виготовлення нащпальних прокладок / Осташко І. О., Виноградов Б. В., Ващенко Ю. М., Гірін О. Б.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” - № а201309488; заявл. 29.07.2013; опубл. 25.04.2014; Бюл. № 8.

19. Пат. 109467 С Україна, В02С 13/14. Відцентровий млин / Гірін О.Б., Виноградов Б. В., Ємельяненко В. І., Осташко І. О.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” - № а201308263; заявл. 01.07.2013; опубл. 25.04.2014; Бюл. № 8.

Тези доповідей в збірках матеріалів конференцій:

20. Виноградов Б. В. Дослідження процесу подрібнення твердого залишку піролізу зношених автомобільних шин / Б. В. Виноградов, І. А. Осташко, В. І. Ємельяненко // IV Міжнародна науково-технічна конференція студентів аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології», 22-24 квітня 2009 року: збірник тез доповідей. – Дні-ськ. – 2009. – С. 250.

21. Виноградов Б. В. Повышение эффективности применения твердого остатка пиролиза изношенных шин в качестве наполнителя эластомерных материалов / Б. В. Виноградов, Ю. Н. Ващенко И. А. Осташко, В. И. Емельяненко // I Международная научно-практическая конференция и научно-техническая выставка-форум: «Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии. Проблемы и перспективы» тезисы (Одесса 28 сентября – 2 октября 2009) – С. 41-42.

22. Осташко І. О. Кінетика процесу подрібнення твердого залишку піролізу зношених автомобільних шин / І. О. Осташко, Б. В. Виноградов // Тези доповід. 5 Між народ. науково-технічн. Конф. „Хімія і сучасні технології”. Т.1. Дні-вськ. – 2011. 20 – 22 квітня. С. 36.

23. Осташко І. О. Числове моделювання аеродинамічних процесів у проточній частині відцентрового млина / І. О. Осташко, Б. В. Виноградов // Тези доповід. II Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Комп’ютерне моделювання та оптимізація складних систем». Дніпро. – 2016. 1-3 листопада. – С 85-87. Особистий внесок здобувача: провів числове моделювання аеродинамічних процесів, аналіз результатів та зробив висновки.

24. Осташко І. О. Утилізація твердих залишків піролізу гумотехнічних відходів / І. О. Осташко, Б. В. Виноградов // Тези доповід. VII Між народ. науково-технічн. конф. „Хімія і сучасні технології”. Т.6. Дні-ськ. – 2015. – 27 – 29 квітня. – С. 100.

25. Виноградов Б. В. Измельченный твердый остаток пиролиза как наполнитель эластомерных материалов. / Б. В. Виноградов, Ю. Н. Ващенко, И. А. Осташко, В. И. Шувалова // Эластомеры: материалы, технология, оборудование, изделия, тез. докл. 8-я Украинская с международным участием научно-техническая конференция резинщиков – Дні-вськ, 2010. – С. 117–120.

26. Б. В. Виноградов, І. О. Осташко, Ю. Н. Ващенко, В. И. Емельяненко // Інформаційні технології, наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я тези доповіді XVIII міжнародна наук.-прак. конфер.: – Харків, 2010. – С. 206.

27. Vynohradov B. Non-Waste Disposal of Used Automobile Tires / Borys Vynohradov, Ihor Ostashko // Advanced Engineering Forum Vol. 25–2017. P. 157-165. ISSN: 2234-991X. DOI: 10.4028.

ДОДАТОК Б

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор

«Интер-РТИ»

Е.А. Кобилев

2011г.



Акт

лабораторного испытания измельченных твердых остатков пиролиза шин,
как наполнителя резиновых смесей

г. Белая Церковь

6 июня 2011

Комиссия в составе:

1. Технический директор ООО «Интер-РТИ» (г. Белая Церковь) Кобилев Е.А.
2. Докт. техн. наук, проф., зав. каф. ТМ и СМ УГХТУ (г. Днепропетровск) Виноградов Б.В.
3. Начальник ЦЗЛ ООО «Интер-РТИ» (г. Белая Церковь) Терщенко Л. П.
4. Аспирант каф. ТМ и СМ УГХТУ (г. Днепропетровск) Осташко И.А.

Рассмотрела результаты испытаний применения измельченного твердого остатка пиролиза изношенных автомобильных шин в качестве наполнителя при изготовлении резиновых смесей для резиновых прокладок рельсового пути (ДСТУ 2805-94). Измельчение твердого остатка проводилось в центробежной мельнице, разработанной на кафедре теоретической механики и сопротивления материалов Украинского государственного химико-технологического университета.

ДНВЗ УДХТУ
З ОРИГІНАЛОМ ВІРНО

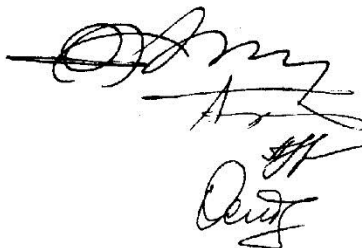


По результатам испытаний сделаны следующие выводы:

1. Измельченный твердый остаток пиролиза (ТОП) изношенных автомобильных шин является перспективным материалом для использования его в качестве альтернативного ТУ П-803 наполнителя резиновых изделий.
2. При введении в рецептуру резиновых смесей продукта ТОП значительно усиливаются диэлектрические свойства резиновой смеси (на 4 порядка выше, чем в резиновой смеси на основе ТУ П-803), а также увеличивается показатель относительного удлинения при разрыве. В тоже время условная прочность при растяжении на 23% ниже, чем у резины с наполнителем марки ТУ П-803.
3. Испытания смеси, изготовленной на основе измельченного ТОП изношенных шин и ТУ П-803 показали, что при соотношении ТОП : П-803 1:1 условная прочность повышается, в тоже время наблюдается снижение диэлектрических свойств и относительного удлинения при разрыве.
4. Измельченный твердый остаток пиролиза изношенных шин на ООО «Интер-РТИ» обосновано использовать при производстве резиновых прокладок для рельсового пути в смеси с техуглеродом П-803 в соотношении 20% ТОП : 80% П-803.

Председатель комиссии

Члены комиссии



Кобилев Е.А.

Виноградов Б.В.

Терещенко Л.П.

Осташко И.А.

ДОДАТОК В

Україна, м. Дніпропетровськ
Область спеціалізованої технічної експертизи
«МІГ
Метал»
Дніпропетровський національний університет
з інженерної справи
№ 3219688

Утверждаю:
И.М. Щербань
Директор
ООО НПП «МИГ Металлургия»

г. Днепропетровск

«02» сентября 2010 г.

Акт

испытаний использования измельченного в центробежной мельнице твердого остатка пиролиза изношенных шин как углеродного наполнителя брикетов металлургических

Комиссия в составе:

1. Директора ООО НПП «МИГ Металлургия» (г. Днепропетровск) Щербаня И.М.
2. Докт. техн. наук, проф., зав. каф. ТМ и СМ УГХТУ Виноградова Б.В.
3. Ст. научн. сотр. ИГТМ НАНУ (г. Днепропетровск) канд. техн. наук. Емельяненко В.И.
5. М.н.с. каф. ТМ и СМ УГХТУ Осташко И.А.

рассмотрела результаты испытаний применения измельченного твердого остатка пиролиза изношенных автомобильных шин в качестве углеродного наполнителя при изготовлении брикетов металлургических. Измельчение твердого остатка проводилось в центробежной мельнице, разработанной на кафедре теоретической механики и сопротивления материалов Украинского государственного химико-технологического университета.

По результатам испытаний сделаны следующие выводы:

ДОДАТОК В