

А.О. Поліщук

Хмельницький національний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОДРІБНЕНИХ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ЯКОСТІ ВИХІДНОЇ СИРОВИНИ ДЛЯ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА 3D-ПРИНТЕРА

Описано полімерні відходи, що утворюються у процесі виготовлення готових виробів за допомогою 3D-друку. Розглянуто фактори, які впливають на вибір способу переробки пластмас. Наведено розподіл сипучих матеріалів за розміром часток. Обґрунтовано використання механічного подрібнення відходів полімерів, як найбільш поширеного методу. Описано фізичні ефекти, які використовуються в різних типах подрібнювачів. Наведено типи обладнання для механічного руйнування різних матеріалів. Вибрано шредер для подрібнення полімерних відходів, що утворюються в процесі 3D-друку, наведено його технічні характеристики та описано принцип роботи. Використовуючи даний пристрій для подрібнення проведено подрібнення полімерних матеріалів, а саме пластиків ABS, PLA, TPU. Проведено ситовий аналіз подрібнених полімерних матеріалів. Побудовано криві розподілу подрібнених часток полімерів. Побудовано графіки залежності подрібнених часток пластиків від середнього розміру часток різних фракцій. Отримано регресійні залежності насипної густини залежно від середнього розміру часток полімерних матеріалів. Проведено визначення густини сформованої мононитки з використанням 3D-принтера з шнековим екструдером, що друкує подрібненими частками, отриманими в процесі подрібнення з використанням шредера.

Ключові слова: полімерний матеріал, подрібнення полімерів, шредер, ситовий аналіз, насипна густина, шнековий екструдер, 3D-принтер, 3D-друк

A.O. Polishchuk

EXPERIMENTAL STUDY OF CRUSHED POLYMER WASTE USED AS INITIAL RAW MATERIAL FOR THE SCREW EXTRUDER OF A 3D PRINTER

Polymeric waste generated in the process of manufacturing finished products using 3D printing is described. Factors that influence the choice of a plastic processing method are considered. The distribution of bulk materials by particle size is given. The use of mechanical grinding of polymer waste as the most common method is substantiated. Physical effects used in different types of shredders are described. Types of equipment for mechanical destruction of various materials are given. A shredder for shredding polymer waste generated in the process of 3D printing is selected, its technical characteristics are given and the principle of operation is described. Shredding of polymer materials, namely ABS, PLA, TPU plastics using a shredder, was carried out. Sieve analysis of crushed polymeric materials was carried out. Distribution curves of crushed polymer particles were constructed. Graphs of the dependence of crushed plastic particles on the average particle size of different fractions were constructed. Regression dependences of the bulk density depending on the average particle size of polymer materials were obtained. The density of the monofilament made using a 3D printer with a screw extruder, which prints with crushed particles obtained in the process of grinding using a shredder, was determined.

Keywords: polymer material, polymer crushing, shredder, sieve analysis, bulk density, screw extruder, 3D printer, 3D printing

Постановка проблеми. Потреба в проведенні експериментальних досліджень для визначення властивостей, таких як насипна густина, розмір часток, густина та інших параметрів подрібнених відходів полімерних матеріалів, стає ключовою при використанні цих матеріалів як вихідної сировини для шнекового екструдера в 3D-принтерах. Подрібнені відходи полімерів можуть мати значну варіативність у властивостях. Відсутність стандартизації цих параметрів ускладнює процес їх використання в якості сировини для 3D-друку. Невідомі або непостійні характеристики матеріалу, такі як розмір часток або насипна густина, можуть суттєво вплинути на процес екструзії, включаючи однорідність потоку матеріалу, швидкість плавлення та якість кінцевого продукту. Для досягнення оптимальних результатів друку необхідно точно знати фізичні властивості матеріалів, що використовуються для того щоб правильно налаштувати параметри екструдера, такі як температура, тиск та швидкість подачі. Використання подрібнених відходів полімерів як сировини є важливим для зменшення відходів та підвищення екологічності виробництва. Однак, без точного визначення їх характеристик, ефективне використання цих матеріалів у 3D-друку може бути ускладненим. Експериментальні дослідження є необхідними для визначення зазначених властивостей, а також для розробки методів їх стандартизації та адаптації процесів екструзії під різні типи матеріалів, що піддаються рециклінгу.

Враховуючи вищезазначені аспекти, необхідно провести ґрунтовні дослідження та розробити нові технологічні підходи для використання подрібнених відходів полімерних матеріалів у сфері 3D-друку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню проблем подрібнення полімерних матеріалів та дослідженню їх властивостей присвятили свої наукові роботи такі вітчизняні вчені, як Місяць В.П., Бурмістенів О.П., Мікульонік І.О., Скиба М.Є., Михайловський Ю.Б. та інші [1-12]. Наукові праці закордонних вчених також направлені на розробку енергоефективного устаткування для механічного руйнування матеріалів та дослідження як робочих органів, так і самого процесу подрібнення [13-20].

Разом з тим, проблема подрібнення відходів полімерних матеріалів для живлення екструдерів 3D-принтерів та дослідження подрібнених часток залишається частково невирішеною і потребує постійного вдосконалення оскільки з'являються нові полімерні матеріали та постійно зростає кількість відходів 3D-друку, швейної та взуттєвої промисловостей.

Виклад основного матеріалу. Потреба в переробці полімерних відходів, що утворюються в процесі виготовлення виробів за допомогою 3D-друку на сьогодні є нагальною. Збільшення виробництва та використання пластикових матеріалів призводить до збільшення об'ємів відходів, що негативно впливає на довкілля. Переробка полімерних відходів допомагає зменшити негативний вплив та зберегти природні ресурси. Полімерні матеріали в процесі виробництва є вартісними ресурсами. Переробка відходів дозволяє їх ефективно використовувати та зменшує витрати на придбання нового матеріалу [21].

Таким чином, переробка полімерних відходів важлива з точки зору екології та економіки і її розвиток є актуальною задачею у сучасному виробництві, зокрема в контексті 3D-друку.

У процесі виготовлення виробів за допомогою 3D-друку утворюються полімерні відходи. Основними типами полімерних відходів, що виникають у цьому процесі, можуть виступати: невдало надруковані деталі через неправильну форму чи друк з дефектами; підтримуючі структури, які необхідні для стабілізації деталей під час друку та які в подальшому видаляються; підложки та краї першого шару, необхідні для виключення деформації та відлипання деталі від платформи 3D-принтера тощо. Відходи пластику ABS, що утворилися в процесі 3D-друку деталей та виробів приведені на рис.1 [22].

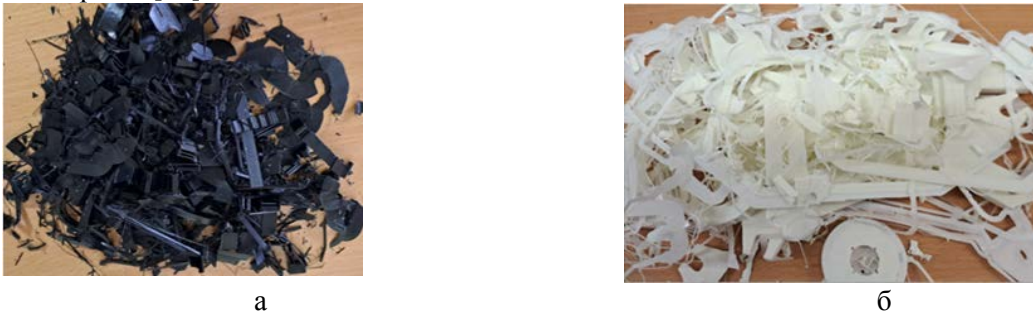


Рис.1. Відходи пластику, що утворилися під час 3D-друку: а-ABS пластик; б-PLA пластик

Переробка полімерних матеріалів охоплює широкий спектр процесів, що перетворюють сировину в продукт із заданими експлуатаційними властивостями для використання. Існує безліч прийомів і способів переробки пластмас, причому вибір конкретного методу залежить від ряду факторів: конструктивних особливостей виробу та умови його експлуатації; властивостей матеріалу, що обробляється, а також економічних факторів, включаючи масовість виробництва та вартість. Існуючі методи переробки полімерів можна класифікувати на три групи: підготовчі, основні та завершальні. Кожен з них має своє специфічне застосування в залежності від потреб виробничого процесу.

Попередня підготовка сировини для шнекового екструдера 3D-принтера є критично важливою, оскільки вона безпосередньо впливає на якість друку, ефективність процесу та довговічність обладнання. Основними факторами, які необхідно враховувати є: розмір та однорідність часток полімеру; вологість матеріалу; температурна підготовка; чистота пластику; контроль якості; ступінь подрібнення та сортування подрібнених часток.

Розмір та однорідність часток полімеру є ключовими характеристиками, які впливають на ефективність і якість процесу екструзії в 3D-принтерах з шнековим екструдером. Однорідний розмір часток забезпечує більш рівномірне плавлення полімеру. Частки неправильної форми

можуть плавитися нерівномірно, викликаючи проблеми зі стабільністю потоку матеріалу в екструдері. Розмір часток впливає на швидкість і тиск, з яким матеріал може бути екструдований. Занадто великі частки можуть призвести до блокування або нерівномірного виходу матеріалу, тоді як занадто маленькі частки можуть викликати проблеми з контролем потоку. Частки неправильної форми можуть призводити до нерівномірності в якості друку, включаючи пористість, недостатню міцність та інші дефекти. Нерівномірний розмір часток може ускладнити розсіювання тепла в матеріалі під час плавлення, що може призвести до перегріву або недостатнього нагріву деяких ділянок. Для забезпечення однорідності часток полімеру може знадобитися додаткова обробка сировини, така як подрібнення, сортування або відсіювання. Це забезпечить більшу однорідність і поліпшить загальну якість екструзійного процесу. Розмір і форма часток мають бути сумісними з конструкцією шнека, щоб забезпечити ефективну подачу і плавлення матеріалу без ризику засмічення або зниження продуктивності.

Таким чином, правильний вибір і підготовка часток полімеру є важливою частиною процесу екструзії, що впливає на якість кінцевого продукту та ефективність виробничого процесу в цілому.

Надмірна вологість у полімерних гранулах може призвести до пароутворення під час процесу плавлення, що спричинить пористість або інші дефекти в друкованому виробі. Сировину потрібно буде попередньо висушити. Для деяких типів матеріалів може знадобитися попереднє нагрівання або витримання в певних температурних умовах перед подачею в екструдер. Забруднення або присутність сторонніх частинок у сировині може спотворити якість друку та пошкодити екструдер. Перед використанням матеріалу необхідно переконатися у його чистоті.

Ступінь подрібнення та сортування подрібнених часток є важливими аспектами в багатьох промислових процесах, включаючи виробництво полімерів, фармацевтику, хімічну промисловість та обробку матеріалів. Ступінь подрібнення характеризується розміром часток. Їх розмір можна оцінити після процесу подрібнення. Він може варіюватися від грубих часток до дрібного порошку.

Сипучі матеріали в залежності від розмірів часток можна розділити на п'ять груп [23]: кускові (більше 10 мм); крупнозернисті (2-10 мм); мілкозернисті (0,5-2 мм); порошкоподібні (0,05-0,5); пилеподібні (<0,5 мм). Оптимальний розмір часток залежить від специфіки процесу та обладнання. Для екструдерів, дрібніше подрібнення може забезпечити кращу переробку та однорідність готового виробу.

Важливою характеристикою сипучих матеріалів являється дисперсність ($1/d$). Дисперсність визначає їх технологічні властивості і може бути виражена функцією розподілення часток (зерен) по крупності.

Сортування часток полягає у відокремленні їх за розміром або іншими властивостями, щоб забезпечити більшу однорідність процесу плавлення в шнековому екструдері. Видалення небажаних часток може покращити якість продукції та запобігти проблемам під час виготовлення готових виробів [24, 25].

Існує багато методів сортування, зокрема:

- просіювання (ситовий аналіз), що використовує сита різних розмірів для розділення часток за розміром;
- повітряна класифікація, яка розділяє частки за розміром та вагою за допомогою потоку повітря;
- гідроциклонування, що використовує вихрові потоки рідини для сортування часток за розміром та густиною;
- оптичне, що застосовує оптичні технології для визначення та відбору часток за розміром, кольором або іншими властивостями;
- магнітне, що використовує дію магнітних полів для відокремлення магнітних часток від немагнітних.

Дані методи можуть комбінуватися або модифікуватися для задоволення специфічних потреб конкретного виробничого процесу.

Вимірювання крупності часток сипучих матеріалів являється одним із важливих методів виробничого контролю процесів, особливо пов'язаних з використанням порошкоподібних і пилеподібних продуктів. В промисловій практиці одним із способів для характеризування сипучого матеріалу по складу є розподілення його часток по розмірам, що визначається ситовим аналізом.

Процес подрібнення знаходить застосування у різних сферах, включаючи домашнє господарство, хімічну промисловість, гірничу справу, легку промисловість та інші галузі [23].

Подрібнення полягає у розділенні одного чи декількох більших шматків матеріалу на менші частини за допомогою механічних або хімічних методів. Хімічне подрібнення може включати розчинення матеріалу з наступним його випадінням у вигляді порошку, як, наприклад, при електролізі металів з утворенням порошку на катоді.

Механічне подрібнення є найбільш поширеним методом і вимагає використання різноманітного обладнання. Вибір устаткування залежить від фізичних та механічних характеристик матеріалу, його початкових розмірів, хімічних властивостей, а також від потреб у дисперсності кінцевого продукту. Важливими характеристиками обладнання для подрібнення є надійність, продуктивність і ефективність витрат на виробництво.

У різних подрібнювачах використовуються певні фізичні ефекти, такі як роздавлювання, стирання, різання, розколювання, а також ультразвукові, температурні та кавітаційні. Ця різноманітність методів призвела до створення широкого асортименту машин для виконання зазначеної операції [23]. Вибір обладнання для подрібнення залежить від розміру шматків первинного матеріалу, його фізично-механічних і хімічних характеристик, а також від необхідної дисперсності кінцевого продукту та продуктивності [1].

За ступенем подрібнення обладнання класифікується на дробарки і млини. Дробарки зазвичай забезпечують грубе, середнє та дрібне подрібнення, а млини виконують грубий, тонкий та надтонкий помел. При грубому подрібненні на дробарках розмір часток після виконання операції складає від 80 до 200 мм, при середньому – від 20 до 80 мм, при дрібному - від 2 до 20 мм. При руйнуванні матеріалу на млинах розмір часток складає при грубому помелі від 0,2 до 2 мм, при тонкому – від 0,01 до 0,2 мм, а при надтонкому – менше 0,01 мм [1].

При виборі обладнання для подрібнення полімерів слід враховувати багато факторів, включно з дисперсністю отриманого продукту, розмірами і механічними властивостями початкового матеріалу, його термічними характеристиками, хімічною реактивністю та її зміною в процесі подрібнення, потенційним забрудненням матеріалу від зносу робочих елементів, ступенем окислення від взаємодії з киснем, вибухонебезпекою та іншими показниками. Ця різноманітність вимог сприяла створенню широкого спектру машин для подрібнення [1].

Відходи полімерних матеріалів можна піддавати подрібненню на спеціалізованому дробильно-помольному обладнанні. Метод, який обирається для подрібнення, залежить від розміру та міцності матеріалу, що обробляється. За принципом дії та конструкцією розрізняють різні типи дробарок, такі як шоккові з різними видами руху шок, конусні з рухомими валами, валкові, молоткові, бігуни, дезінтегратори, а також млини кільцеві, кульові та вібраційні.

Для подрібнення полімерних відходів, що виникають в процесі 3D-друку, було використано подрібнювач від компанії Eро3d [26].

Mini Shredder - це компактний подрібнювач з одним валом, який застосовується для подрібнення пластикових відходів від 3D-друку на частки, що можуть бути знову перероблені в шнековому екструдері 3D-принтера. Він обладнаний однофазним двигуном з редуктором. Одновальна конструкція з низькою частотою обертання забезпечує мінімальний шум при виконанні технологічної операції. Редуктор із зубчастим механізмом створює високий крутний момент і потужність. Виготовлені з загартованої сталі ножі відрізняються високою міцністю і тривалим терміном служби. Використання фільтруючої сітки дозволяє отримувати частки потрібного розміру. Пристрій є зручним в експлуатації та легким у чищенні.

Шредери з одним валом відрізняються простотою конструкції та ефективністю подрібнення, роблячи їх підходящим вибором для подрібнення полімерних відходів, особливо в контексті переробки відходів 3D-друку та інших галузей промисловості.

Технічні параметри міні шредера для подрібнення:

- максимальна частота обертання валу подр. = 15 об/хв;
- розміри бункера для завантаження матеріалу для подрібнення 100x72x100 мм;
- розміри контейнера для подрібненого матеріалу 80x80x40 мм;
- потужність електричного двигуна 180 Вт;
- кількість рухомих ножів 14;
- товщина ножа 3,5 мм;
- діаметр ножа 58 мм;
- діаметр отворів фільтруючої сітки 6 мм.
- матеріал ножа Ст. 45 (загартований та шліфований) [26].

Загальний вигляд міні шредера з його основними елементами приведено на рис. 1.

Шредер з одним валом для подрібнення полімерних відходів працює наступним чином (рис.2). Полімерні відходи завантажуються в бункер 1 шредера (рис.3). Вони можуть бути у вигляді шматків, стрічок, гранул або інших форм, що потребують подрібнення. Всередині шредера знаходиться робочий вал з розміщеними на ньому ножами. Цей вал обертається, забезпечуючи різання, стирання або роздавлювання матеріалу. Під час обертання вала різальні елементи взаємодіють з матеріалом та плитою з пазами, яка розміщена на корпусі пристрою. Коли ножі заходять в пази плити, то відбувається розрізання матеріалу на менші частини. В нижній частині шредера розміщена сітка з отворами певного діаметру, які дозволяють регулювати максимальний розмір часток. Частки меншого діаметра просіваються через решітку, а більшого знову захоплюються ножами і подаються в зону різання. Подрібнені частки, які просіваються через сітку, накопичуються в спеціальному контейнері для подальшої переробки або використання (рис.4).



Рис.2. Міні шредер для подрібнення полімерних відходів: 1-завантажувальний бункер; 2-контейнер для подрібнених часток полімеру; 3-регулятор частоти обертання подрібнюючого органу; 4-полімерний матеріал, що подрібнюється; 5-подрібнені частки полімеру



Рис.3. Завантажувальний бункер з полімерними відходами

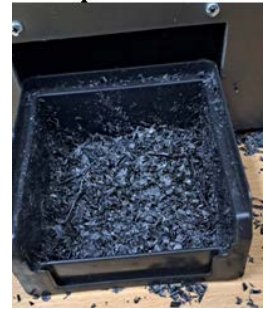


Рис.4. Контейнер з подрібненими полімерними частками

Для виконання операції подрібнення було відібрано відходи трьох видів: ABS, PLA та TPU пластику, що утворилися в процесі 3D-друку. В подальшому вони піддавалися операції механічного руйнування за допомогою вибраного устаткування та просіюванню за допомогою ситового аналізу.

Процес виконання операції подрібнення ABS пластику ножами шредера показано на рис.5.



а



б

Рис.5. Подрібнення пластику ABS ножами шредера: а-куски матеріалу в бункері; б-захоплення кусків матеріалу ножами

У зв'язку з тим, що діаметр отворів в сітці шредера складає 6 мм, для отримання необхідних фракцій подрібненого полімеру 2,5 мм і менше, було встановлено у шредері додаткову сітку з діаметром отворів 3 мм. Куски полімерного матеріалу, що подрібнювалися ножами, просівалися через неї.

Загальний вигляд подрібнених часток ABS пластику показано на рис.6.



Рис.6. Подрібнені частки ABS пластику, що утворилися з відходів 3D-друку: а-частки після першого подрібнення; б-частки після другого подрібнення

Під час виконання операції подрібнення Mini Shredder забезпечив високошвидкісні та високоякісні результати за низького енергоспоживання.

Для проведення експериментальних досліджень із ситового аналізу та насипної густини подрібнених часток, визначення густини надрукованої з полімерних відходів на 3D-принтері з шнековим екструдером мононитки, використовувалося наступне обладнання: мірні ємності різного об'єму; ваги лабораторні; штангенциркуль; вібраційна установка 028-М; комплект сит.

В подальшому подрібнені матеріали піддавалися ситовому аналізу. У процесі ситового аналізу використовували 6 металопробивних сит з діаметром оболонки 200 мм та висотою стінки 50 мм, виготовлених з оцинкованої сталі [27]. Діаметри отворів на ситах склали: 1,0 мм; 1,2 мм; 1,5 мм; 1,8 мм; 2,0 мм; 2,4 мм. Розмір часток фракції матеріалу визначався за розміром отворів сит, розташованих одне над іншим. Наприклад, якщо розмір отвору нижнього сита становить 1,0 мм, а верхнього - 1,2 мм, то частки, що залишаються між цими ситами після просіювання, будуть мати розмір у діапазоні від 1,0 до 1,2 мм.

За допомогою набору сит подрібнені частки матеріалу розділяються на фракції за розміром зерен. Проба матеріалу, що аналізується, поміщається на сито з найбільшими розмірами отворів в наборі, що використовується. Подрібнені частки, що проходять через сито, падають на наступне, більш тонке, сито і так до останнього з найменшим діаметром отворів [23]. При просіюванні сита встановлюються одне на одне (рис.7). Набір сит з подрібненими частками розміщується на лабораторній вібраційній машині 028-М. Через заданий проміжок часу проба матеріалу розділяється на фракції.

Кількість подрібненого матеріалу, що залишається на ситах після процесу просіювання, кількісно оцінювалася, а потім визначалася його частка у відсотках від загальної маси, взятої на аналіз проби (рис.8).



Рис.7. Металопробивні сита



Рис.8. Визначення маси фракції матеріалу на ситі

Фото розподілених по фракціях на ситах після виконання операції просіювання подрібнених часток показано на рис.9, а після кількісного оцінювання – на рис.10.

Результати ситового аналізу зазвичай візуалізуються за допомогою графіка диференціальної кривої розподілу. Ця крива відображає відсоткову частку кожної фракції в загальній масі матеріалу. На графіку кожна точка відповідає фракції з певним середнім розміром зерен, яка визначається як середнє арифметичне між розмірами отворів двох сусідніх сит. Таким чином, фракція, яка пройшла через одне сито і затрималася на наступному, відображається на графіку як точка, що відповідає цьому середньому розміру.

Масова доля подрібнених часток у фракції визначається із співвідношення [23]:

$$M_{\text{ф.}} = \frac{M_i}{M_{\text{заг.}}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

де M_i - маса часток на ситі, г; $M_{заг.}$ - загальна маса всіх фракцій, що рівняється початковій масі завантаженого на сито з найбільшими отворами подрібненого полімеру, г.



Рис.9. Розподілені по фракціях подрібнені частки після просіювання

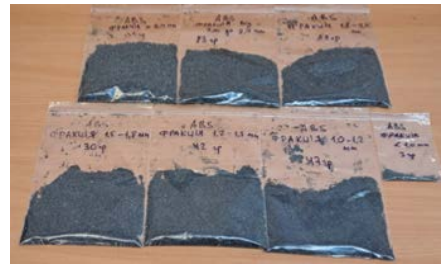


Рис.10. Розподілені по фракціях подрібнені частки після зважування

Визначивши середні розміри зерен між розмірами отворів двох сусідніх сит та за формулою (1) масову долю кожної фракції (рис.7), використовуючи програмне середовище MicroSoft Excel, було отримано криві розподілу подрібнених часток, що піддавалися механічній дії робочих органів шредера. Графіки розподілу подрібнених часток ABS, PLA і TPU пластиків з визначеними поліноміальними регресійними залежностями приведено на рис.11-13.

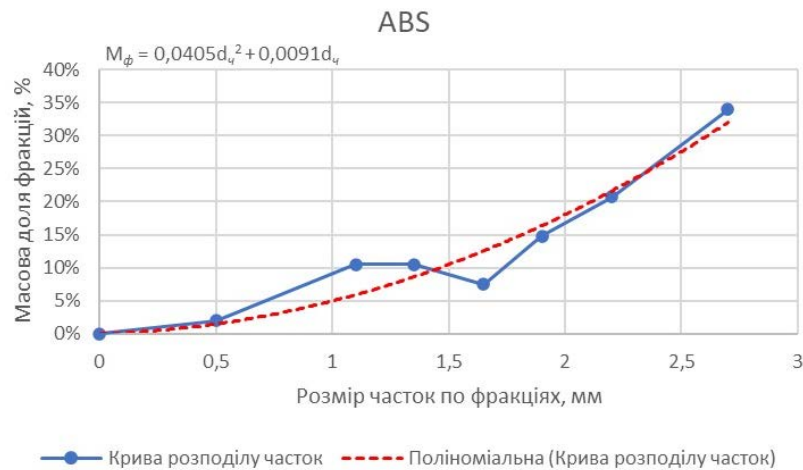


Рис. 11. Крива розподілу подрібнених часток ABS пластику

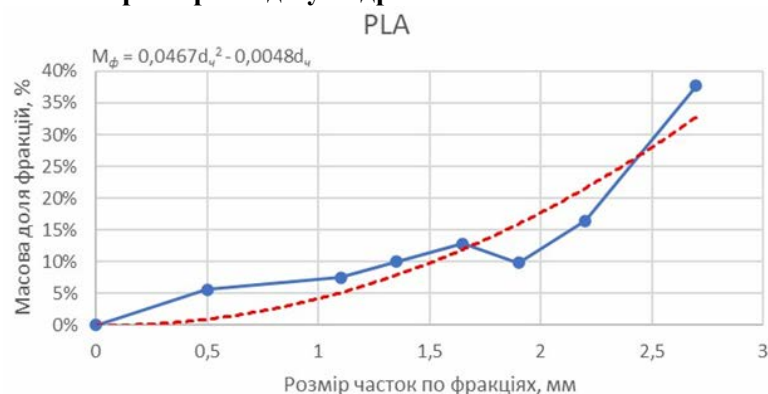


Рис. 12. Крива розподілу подрібнених часток PLA пластику

Далі було проведено визначення насипної густини пластиків, що піддавалися подрібненню. Метою експериментального дослідження було отримання залежностей насипної густини від фракційного складу матеріалу, що подрібнювався.

Насипна густина сипучого матеріалу визначається як маса цього матеріалу на одиницю об'єму, який він займає. Цей параметр є ключовим при визначенні необхідного об'єму бункерів дробарок, змішувачів та при розрахунку енерговитрат на переробку сипучих матеріалів [4]. Значення насипної густини залежить від багатьох факторів, включно з розміром і густиною часток, вмістом вологи та їх взаємним розміщенням у шарі [28].

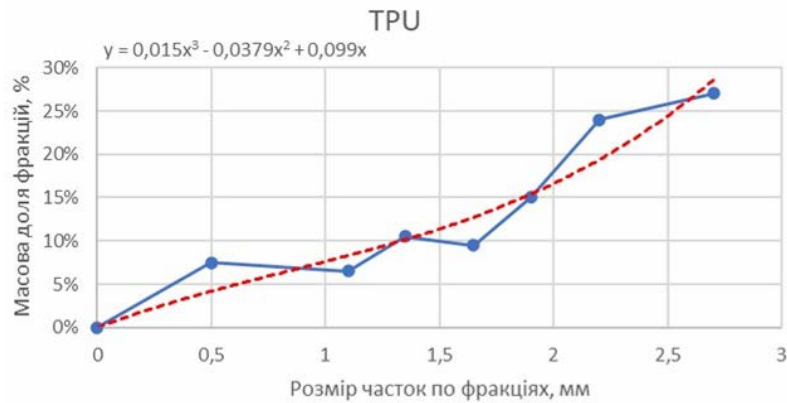


Рис.13. Крива розподілу подрібнених часток TPU пластику

Важливо зазначити, що насипна густина може змінюватися навіть при зберіганні матеріалу в спокої; вона може збільшуватися під впливом вібрацій ємності або зменшуватися при перемішуванні, наближаючись до певного граничного значення. Для деяких матеріалів коефіцієнт насипної густини може досягати 1,52 [29].

За гранулометричним складом сипучого матеріалу оцінюють кількісний розподіл часток, що входять до його складу, вимірюючи лінійні розміри. Більшість сипучих матеріалів мають частки неправильної форми. Для них умовний діаметр d_i , розраховується як середнє арифметичне або середнє геометричне трьох вимірювань лінійних розмірів частки (довжина, висота і ширина).

Сипучий матеріал лише в деяких випадках складається з частинок однакового розміру. Частіше в ньому значення d_i змінюється дискретно від деякого мінімального розміру d_{min} до максимального d_{max} . Відношення d_{min}/d_{max} у деяких сипучих матеріалах може бути дуже великим. Про розподіл часток полідисперсних матеріалів за розміром можна дізнатися за допомогою ряду розподілу дискретної випадкової величини d_i , в якому перераховані значення цієї випадкової величини: $d_1; d_2; d_n$ з відповідною ймовірністю p_1, p_2, \dots, p_n або частотами n_1, n_2, \dots, n_n . Визначення цілого ряду дискретних випадкових значень d_i для полідисперсних матеріалів з великим відношенням d_{min}/d_{max} є складною задачею, тому цей ряд замінюють дискретним рядом класів (часток) значень d_i . Для визначення гранулометричного складу сипучих матеріалів в даних дослідженнях використано методи прямого вимірювання та ситового аналізу [29].

Суміш різних фракцій готувалася у певному співвідношенні. За допомогою мірної ємності та вагів визначалася насипна густина кожної фракції подрібненого полімеру та суміші.

В якості матеріалу для дослідження застосовувалися подрібнені відходи полімерних матеріалів, що використовувалися при ситовому аналізі.

При проведенні досліджень застосовувався метод симплексно-решіткового планування експерименту [29]. Суміші подрібненого ABS-пластику формували трьома просіяними фракціями (табл. 1), масова частка яких змінювалася на чотирьох рівнях: 0; 0,33; 0,66, 1.

Насипну густина сипучого матеріалу, що досліджувався розраховували за формулою:

$$\rho_{н.г.} = \frac{m_{е.м.} - m_{е.}}{V_{м.е.}} \quad (2)$$

де $m_{е.м.}$ – маса ємності з матеріалом; $m_{е.}$ - маса ємності без матеріалу; $V_{м.е.}$ – об'єм ємності.

Експерименти повторювали три рази. Результати експерименту з визначення насипної густини подрібнених полімерних відходів приведені в табл.1.

Табл. 1.

Гранулометричний склад фракцій досліджуваних матеріалів

Розмір часток пластику ABS, мм	1,2	1,8	2,5
Визначення кількісного вмісту	X1	X2	X3

В результаті обробки експериментальних даних встановлено, що насипна густина сумішей фракцій подрібнених матеріалів розміром від 1,2 до 2,4 мм змінюється в межах 15 % (рис.14-16), тому отримані експериментальні дані апроксимовано залежно від середнього розміру часток у суміші матеріалів за формулою [29]:

$$d_{ч.с.} = d_1 \cdot X_1 + d_2 \cdot X_2 + d_3 \cdot X_3 \quad (3)$$

де d_1, d_2, d_3 - розмір часток у фракціях суміші, X1, X2, X3 - кількісний вміст фракцій у суміші.

Результати експерименту по визначенню насипної густини подрібнених часток ABS пластику приведені в табл.2.

Табл.2.

Результати експерименту для ABS пластику

№	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3	Yсер.
1	1	0	0	389,24	392,3	392,27	391,27
2	0	1	0	371,4	370,6	370,4	370,80
3	0	0	1	366,9	365,7	366,42	366,44
4	0,33	0,33	0,33	376,2	376,0	378,2	376,80
5	0,33	0,66	0	371,3	371,9	371,48	371,56
6	0	0,33	0,66	362,9	363,0	363,43	363,11
7	0,66	0,33	0	369,1	369,0	368,57	368,89
8	0,33	0	0,66	367,5	367,9	367,94	367,78
9	0,66	0	0,33	373,2	373,6	373,88	373,56
10	0	0,66	0,33	369,4	369,0	368,93	369,11

Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток ABS пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій приведено на рис.14.

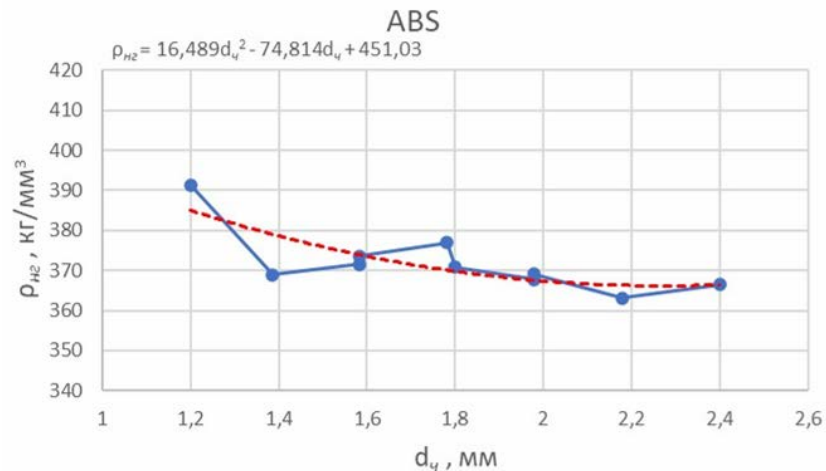


Рис.14. Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток ABS пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій

Результати експерименту по визначенню насипної густини подрібнених часток PLA пластику приведені в табл.3.

Табл.3.

Результати експерименту для PLA пластику

№	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3	Yсер.
1	1	0	0	333,1	333,4	333,49	333,33
2	0	1	0	294,7	294,92	294,84	294,82
3	0	0	1	308,91	308,87	308,68	308,82
4	0,33	0,33	0,33	305,0	305,2	305,13	305,11
5	0,33	0,66	0	292,45	292,5	292,37	292,44
6	0	0,33	0,66	300,22	300,3	300,14	300,22
7	0,66	0,33	0	302,5	302,2	302,62	302,44
8	0,33	0	0,66	306,5	306,65	306,86	306,67
9	0,66	0	0,33	307,9	308,0	307,44	307,78
10	0	0,66	0,33	296,3	296,0	296,36	296,22

Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток PLA пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій приведено на рис.15.

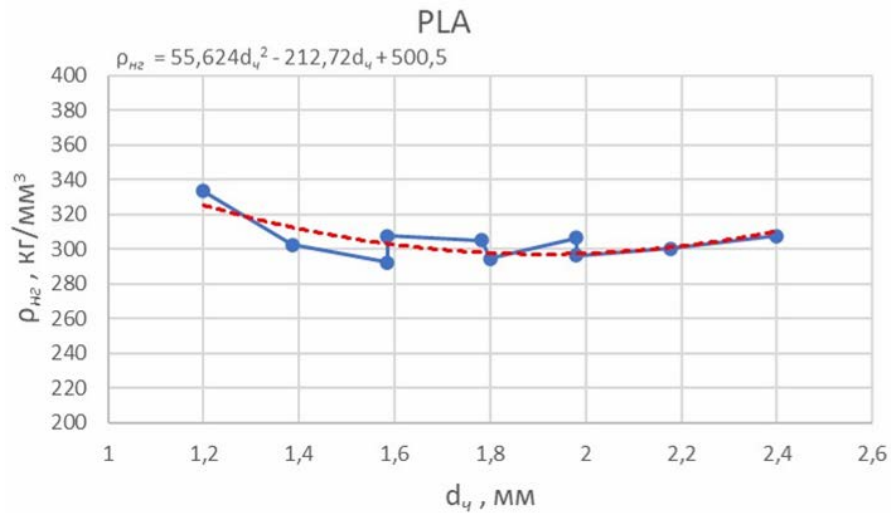


Рис.15. Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток PLA пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій

Результати експерименту по визначенню насипної густини подрібнених часток TPU пластику приведені в табл.4.

Табл.4.

Результати експерименту для TPU пластику

№	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3	Yсер.
1	1	0	0	340,4	340,1	339,5	340,0
2	0	1	0	299,7	300,1	300,2	300,0
3	0	0	1	286,6	286,7	287,01	286,77
4	0.33	0.33	0.33	300,64	300,7	300,67	300,67
5	0.33	0.66	0	313,4	313,5	313,09	313,33
6	0	0.33	0.66	286,7	286,8	286,51	286,67
7	0.66	0.33	0	306,5	306,7	306,81	306,67
8	0.33	0	0.66	300,1	300,2	299,7	300,0
9	0.66	0	0.33	319,8	320,2	320	320,0
10	0	0.66	0.33	293,1	293,4	293,49	293,33

Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток TPU пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій приведено на рис.16.

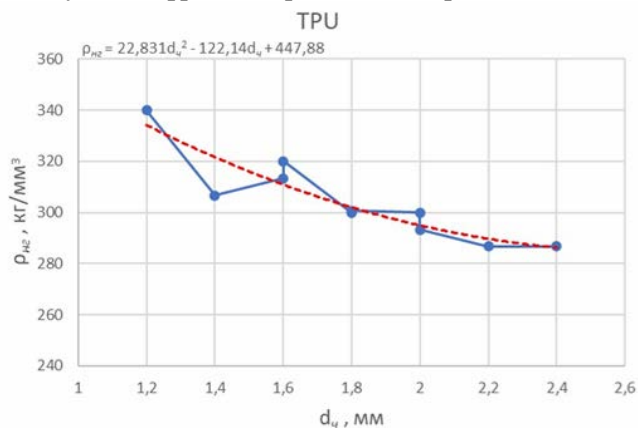


Рис.16. Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток TPU пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій

Для визначення густини сформованої мононитки з подрібнених часток полімерних матеріалів, використовувався 3D-принтер з шнековим екструдером. За допомогою нього друкувалася полімерна нитка (рис.17). Після її остивання брався зразок довжиною 50 см. За допомогою штангенциркуля визначався його діаметр, а за допомогою вагів – маса.



Рис.17. Монітка надрукована з подрібнених часток ABS пластику на 3D-принтері з шнековим екструдером

Об'єм зразка визначався за формулою [30]:

$$V_{n.з.} = \frac{\pi \cdot d_{n.з.}^2 \cdot l_{n.з.}}{4}, \quad (4)$$

де $d_{n.з.}$ - діаметр полімерного зразка;

$l_{n.з.}$ - довжина полімерного зразка.

Для розрахунку густини матеріалу використовувалася формула:

$$\rho_{n.м.} = \frac{m_{n.з.}}{V_{n.з.}}, \quad (5)$$

де $m_{n.з.}$ - маса полімерного зразка; $V_{n.з.}$ - об'єм полімерного зразка.

Провівши розрахунки за формулами (4, 5), було визначено густину полімерних матеріалів, що досліджувалися. Результати розрахунків занесено в табл.5.

Похибка між табличним та експериментальним значеннями густини визначалася за формулою [31]:

$$\varepsilon = \frac{\pm(x_{вим.} - x_{\delta})}{x_{\delta}} \cdot 100\% = \frac{\pm\Delta_x}{x_{\delta}} \cdot 100\% \quad (6)$$

де x_{δ} - дійсне значення вимірюваної величини; $x_{вим.}$ - вимірне значення величини;

Δ_x - відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини.

За дійсне значення вимірюваної величини приймалася густина полімерного матеріалу, що наводиться в довідниках.

Найбільша похибка при розрахунку за формулою (6) довідникових та експериментальних значень густини (табл.5) склала 6,95% для пластику TPU.

Проведений аналіз показав, що значення густин ABS, PLA та TPU пластиків, що досліджувалися знаходяться в межах допустимого.

Отримані функції для розрахунку насипної густини полімерних матеріалів в залежності від середнього розміру часток представлені в табл.5.

В роботі [29] було визначено функції розрахунку насипної густини в залежності від середнього розміру часток для наступних полімерних матеріалів: гуми, поліетилену та PVC пластику (табл.6). Отримані залежності можна також використовувати в розрахункових формулах при визначенні об'ємної продуктивності шнекового екструдера 3D-принтера.

Висновки. У ході проведеного експериментального дослідження було вивчено можливість використання подрібнених відходів з ABS, PLA та TPU пластику, що з'явилися в процесі 3D-друку, в якості вихідної сировини для шнекового екструдера 3D-принтера.

1. Обраний шредер з одним валом та розміщеними на ньому ножами, якісно подрібнював вибрані полімерні матеріали до потрібної фракції.

2. Проведений ситовий аналіз з використанням набору сит з різними діаметрами отворів на ситці дозволив побудувати криві розподілу подрібнених часток і на основі них отримати регресійні залежності, які ілюструють зв'язок між масовою долею фракції та діаметром подрібнених часток.

Табл.5.

Функції розрахунку насипної густини залежно від середнього розміру часток

полімерних матеріалів: ABS, PLA та TPU пластиків

№ п/п	Матеріал	Експериментальне значення густини $\rho_{п.м.}$, кг/м ³	Довідникове значення густини $\rho_{п.м.}$, кг/м ³	Насипна густина суміші фракцій 1,2...2,4 мм, кг/м ³
1	Пластик ABS	1110	1050	$\rho_{н.з.} = 22,831d_{ч.}^2 - 122,14d_{ч.} + 447,88$
2	Пластик PLA	1245	1200	$\rho_{н.з.} = 55,624d_{ч.}^2 - 212,72d_{ч.} + 500,5$
3	Пластик TPU	1230	1150	$\rho_{н.з.} = 88,542d_{ч.}^2 - 586,67d_{ч.} + 1303,2$

Табл.6.

Функції розрахунку насипної густини залежно від середнього розміру часток полімерних матеріалів: гуми; поліетилену та PVC пластику

№ п/п	Матеріал	Густина полімеру $\rho_{п.м.}$, кг/м ³	Насипна маса суміші фракцій 10,0...2,0 мм, кг/м ³
1	Пластик PVC	1250	$\rho_{н.з.} = 519 - 423 \exp(0,834d_{ч.})$
2	Гума	1100	$\rho_{н.з.} = 478 - 309 \exp(0,7224d_{ч.})$
3	Поліетилен	950	$\rho_{н.з.} = 398 - 257 \exp(0,6724d_{ч.})$

3. Експериментальні дослідження із визначення насипної густини дали змогу побудувати графіки залежності насипної густини від діаметра часток подрібнених полімерів і на основі них отримати регресійні рівняння. Вони будуть практичне застосування при визначенні об'ємної продуктивності шнекового екструдера 3D-принтера.

4. Проведене визначення густин надрукованих з полімерних відходів на 3D-принтері з шнековим екструдером мононіток дало змогу встановити дійсні величини густин та порівняти отримані значення з довідниковими даними.

В загальному можна підсумувати, що здійснені експериментальні дослідження з подрібнення полімерних відходів дали змогу підібрати устаткування для їх механічного руйнування та отримати фракції часток, які будуть вихідною сировиною для шнекового екструдера 3D-принтера.

Список використаних джерел:

1. Місяць В.П. Розвиток наукових основ проектування обладнання для подрібнення відходів термопластичних і гумових матеріалів легкої промисловості : Дис... д-ра наук: 05.05.10 - 2008. – 365с.
2. Місяць В.П. Моделювання процесу різання гум і термопластичних матеріалів між двома ножами в роторних дробарках // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. - № 5. - С.145-149.
3. Місяць В.П., Бурмістенков О.П., Гладчук О.З. Моделювання процесів руйнування полімерних матеріалів при подрібненні // Вісник КНУТД. – 2007. - №3. - С. 40-45.
4. Рубанка М.М., Місяць В.П. Відходи легкої промисловості, способи переробки та області подальшого використання. Вісник КНУТД. Серія «Технічні науки». №4 (88), 2015. –С.34-39.
5. Мікульонок І.О., Карвацький А.Я., Лелека С.В., Іваненко О.І. Валкові дробарки і млини (Огляд конструкцій). Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження 2022. №1. – С.30-43.
6. Скиба М.Є. Наукові основи ресурсозберігаючих технологій переробки відходів натуральних шкір у матеріали та вироби взуттєвого виробництва: дис... д-ра техн. наук: 05.19.06 / Київський національний ун-т технологій та дизайну. - К., 2004. – 418с.
7. Скиба М.Є. Обладнання для переробки відходів. – Хмельницький: ПП Ковальський В.В., 2004. – 124 с.
8. Скиба М.С., Михайловський Ю.Б., Золотенко Е.О. Методика розрахунку технологічних та конструктивних параметрів молоткового подрібнювального обладнання//Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.-Хмельницький. - 2008. - №2 - С. 41-45.
9. Скиба М.Є., Михайловський Ю.Б., Золотенко Е.О. Моделювання процесу руйнування текстильного матеріалу в молоткових подрібнювачах // Вісник Хмельницького національного університету. - 2006. - № 5. - С. 30-34.

10. Скиба М.Є., Михайловський Ю.Б., Головка Г.С. Моделювання процесу подрібнення композиційних матеріалів з використанням методу скінченних елементів // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2003. – №6. – С. 7-11.
11. Михайловський Ю.Б., Золотенко Е.О. Визначення факторів які суттєво впливають на ефективність проектування молоткового подрібнювача текстильних матеріалів. Вісник КНУТД. №5, 2010. –С.76-80.
12. Заяць В.В., Михайловський Ю.Б. Визначення оптимальних параметрів основних характеристик подрібнення полімерів у роторних дискових подрібнювачах. Східно-Європейський журнал передових технологій. № 2/3 (50). 2011. С.50-53.
13. Muiywa A. Okusanya, Gbenga W. Ibrahim. Design and Development of Plastic Crusher for a More Efficient Waste Management Practice. International Journal of Innovative Research and Development. August 2020. DOI: 10.24940/ijird/2020/v9/i8/AUG20075.
14. Li-Mei Zhao, Lun-Jun Chen. Modeling and simulation on crushing process of impact crusher. Journal of the China Coal Society. August 2013.
15. Guochen Duan, Boqiang Shi, Jie Gu, Guochen Duan, Boqiang Shi, Jie Gu. Research of Single-Particle Compression Ratio and Prediction of Crushed Products and Wear on the 6-DOF Robotic Crusher. Mathematical Problems in Engineering. March 2021. DOI: 10.1155/2021/6634272.
16. Ciężkowski P., Maciejewski J., Bąk S. Experimental studies on the efficiency of the crushing processes. Publisher: LAP Lambert Academic Publishing, 2018. ISBN: 978-613-9-84936-9.
17. Sokgun Hong, Un Chol Han, Gum Chol Kim. Numerical Simulation of the Collision Breakage Process between the Agglomerate and Hammer in a Hammer Crusher Using DEM. Shock and Vibration. July 2023. DOI: 10.1155/2023/2838179.
18. Dong Gang, Fan Xiumin, Huang Dongming. Analysis and optimization of cone crusher performance. Minerals Engineering. October 2009. DOI: 10.1016/j.mineng.2009.03.020.
19. Yueqing Xing, Sun Deqiang, Sun Deqiang, Meiyun Zhang, Shu Guowei, Shu Guowei. Crushing Responses of Expanded Polypropylene Foam. Polymers. April 2023. DOI: 10.3390/polym15092059.
20. Muiywa Okusanya, Ibrahim Gbenga Design and Development of Plastic Crusher for a More Efficient Waste Management Practice. International Journal of Innovative Research and Development. August 2020.
21. Поліщук А.О., Скиба М.Є., Поліщук О.С. Перспективи розробки обладнання для подрібнення відходів 3D-друку. Мехатронні системи : інновації та інжиніринг: тези доповідей VII Міжнародної наук.-практ. конф. / Київ : КНУТД, 2023. С.115-116.
22. Поліщук А.О. Розробка системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера. Технології та інжиніринг. 2023. № 6.
23. Хіміко-технологічні процеси в виробництвах легкої промисловості та електропобутової техніки. Лабораторний практикум для студентів спеціальностей «Обладнання легкої промисловості», «Електропобутова техніка»/ О.С. Поліщук, П.Г. Капустенський, А.К. Кармаліта, Д.В. Прибега – Хмельницький: ХНУ, 2004. - с.
24. Білоус О.І. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Процеси та апарати харчового виробництва». – Кам'янське: ДДТУ, 2019р. – 67с.
25. Черевко О.І., Поперечний А.М. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник / О.І. Черевко, А.М. Поперечний. - 2-е видання, доп. та випр. — Х.: Світ Книг, 2014. - 495с.
26. Подрібнювач Mini Shredder + [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://epo3d.com/uk/katalog/shredder/razmelchitel-mini-sredder-.html>
27. Сита лабораторні. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://surl.li/oaof>.
28. Рубанка М.М., Місяць В.П. Експериментальні дослідження динаміки роторної дробарки для переробки відходів легкої промисловості / Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. - 2016. - № 1. - С.27-36.
29. Misiats O., Misiats V., Rubanka M., Polishchuk A., Skyba M. Determination of bulk density of mixtures of fractions of crushed polymeric materials. Actual problems of modern science. Monograph: edited by Matiukh S., Skyba M., Musial J., Polishchuk O. Bydgoszcz (Poland). 2021 2021. pp. 462-466.
30. Бровченко О.М. Геометрія в таблицях і схемах. – К.: ТОВ «ВП Логос-М», 2021. - 125с.
31. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Метрологія та вимірювання: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2014. - 292 с.