

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Останнім часом в харчовій та переробній промисловості виникла проблема по раціональному використанню відходів виробництва таких, як лузга соняшника та гречки, солома, висівки, жом, пивна дробина, деревна стружка та ін.. В більшості випадків ці відходи використовують в якості біопалива та комбікормів. Але, зважаючи на невелику насипну густину таких матеріалів, транспортування їх є економічно не вигідним. Це обумовлює збільшення насипної густини цих матеріалів за рахунок пресування (брикетування, гранулювання, тюкування та ін.). Виходячи з аналізу різних технологій пресування, процес гранулювання є найбільш раціональним, оскільки реалізується в безперервному режимі, дозволяє отримати вироби найбільшої густини, забезпечує універсальність подальшого використання гранул, а також гранульовані матеріали мають більшу стійкість при зберіганні й займають в 3-5 разів менший об'єм.

Актуальність теми. Інтенсифікація процесів ущільнення дисперсних матеріалів (ДМ), що особливо помітна останнім часом при виробництві твердого біопалива, обумовлює усе більш жорсткі вимоги до показників ефективності роботи основних технологічних систем. Тому при проектуванні таких машин і апаратів необхідне визначення взаємозв'язку між конструктивними (розміри робочих зон машин, форма й швидкості руху робочих органів і т.п.) і технологічними (продуктивність машини, тиск, температура, фізико-механічні характеристики оброблюваного матеріалу й т.п.) параметрами. Традиційний підхід до проектування такого типу встаткування заснований на емпіричних залежностях і експериментальному досвіді і не дозволяє дати кількісну оцінку взаємовпливу конструктивно-технологічних параметрів процесів обробки й структурно-механічних характеристик сировини. Враховуючи широку номенклатуру типів сировини, отримуємо багатопараметричну задачу, тобто набуває актуальності пошук оптимального розподілу цих параметрів. Тому задача по використанню сучасних методів математичного моделювання для аналізу закономірностей процесу гранулювання дисперсних матеріалів екструзією, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Наукові дослідження, виконані автором дисертаційної роботи, пов'язані з науково-дослідною роботою (НДР) кафедри теоретичної механіки та ресурсоощадних технологій НУХТ у межах тем: «Інноваційні енерго- і ресурсоощадні технології та розробка наукових основ методів дослідження міцності та стійкості елементів конструкцій машин і апаратів харчових виробництв» (№0112U004631), «Створити фізико-технічні основи проектування обладнання для термохімічної конверсії суміші відходів сільгоспсировини з низькоякісним вугіллям» (№0112U001082) та «Створити фізико-технічні основи проектування процесів попередньої обробки та спалювання відходів сільгоспсировини з метою розроблення технології їх високоефективної утилізації» (№0211U013319). Автор особисто приймав участь у розробленні методик, проведенні лабораторних та промислових досліджень, обробленні та аналізі отриманих результатів, розробленні технічної документації на виготовлення дослідно-промислового зразка гранулятора.

Мета і завдання дослідження. Основною метою дисертаційної роботи є дослідження процесу гранулювання дисперсних мас (лузга соняшника та гречки, солома, висівки, деревна стружка та ін.) екструзією і розробка інформаційної технології проектування (ІТП) відповідного обладнання для оброблення ДМ екструзією та використання розробленої ІТП при проектуванні вузла пресування гранулятора оптимальної конструкції в технології гранулювання біомаси при виробництві паливних гранул.

У відповідності з поставленою метою були сформульовані основні задачі роботи:

- дослідити вплив температури на якість (густина) гранул в процесі гранулювання дисперсних мас екструзією;
- створити методикку визначення реологічних параметрів дисперсних матеріалів (лузга соняшника, солома, висівки, деревна стружка та ін.);
- створити математичну модель процесу гранулювання дисперсних мас екструзією;
- дослідити вплив геометричних параметрів вузла пресування гранулятора на густина гранул;
- шляхом фізичного моделювання довести адекватність проведених теоретичних досліджень;
- розробити методикку визначення оптимальних конструктивно - технологічних параметрів вузла пресування гранулятора, сформулювати задачу оптимізації, обрати цільову функцію та керуючі параметри для процесу гранулювання дисперсних матеріалів екструзією;
- розв'язати задачу оптимізації та визначити оптимальний розподіл керуючих параметрів для процесу гранулювання дисперсних матеріалів екструзією;
- на основі проведених обчислювальних експериментів визначити оптимальні конструктивно – технологічні параметри вузла пресування та, базуючись на них, розробити рекомендації щодо проектування вузла пресування гранулятора.

Об'єкт дослідження: процес гранулювання дисперсних матеріалів екструзією та обладнання для його реалізації.

Предмет дослідження: метод визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів процесу гранулювання.

Методи дослідження: включають в себе теоретичні дослідження з використанням сучасних методів математичного моделювання, які базуються на основних положеннях механіки дисперсних середовищ та чисельних методах (проектно–сіткових) розв'язання відповідних задач математичної фізики, а також експериментальні дослідження з використанням фізичних моделей, що спрямовані на визначення реологічних властивостей ДМ (сировини), впливу температури на якість (густина) кінцевого продукту (гранули) та на перевірку розроблених теоретичних методів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- створена математична модель процесу гранулювання дисперсних матеріалів екструзією і на її основі запропоновано новий підхід до проектування вузла пресування гранулятора оптимальної конструкції;

- розроблено методику визначення реологічних властивостей твердої фази ДМ рослинного походження;

- досліджено закономірності процесу ущільнення ДМ в залежності від температури;

- досліджено закономірності взаємовпливу технологічних факторів і конструктивних параметрів вузла пресування гранулятора у процесі пресування екструзією на основі проведеного комплексу обчислювальних експериментів.

Практичне значення одержаних результатів:

- визначені оптимальні конструктивні параметри вузла пресування гранулятора з кільцевою матрицею;

- на основі проведених досліджень, розроблені рекомендації щодо конструювання вузла пресування гранулятора, що враховують оптимальний розподіл конструктивно-технологічних параметрів в залежності від типу сировини, що гранулюється;

- впроваджені результати проведених обчислювальних експериментів по дослідженню процесів гранулювання дисперсних матеріалів, що дозволили визначити оптимальні режими та енергоощадні способи гранулювання (захищено патентами України №№ 30058 U, 62321 U, 63965 U, 62324 U) та впроваджені на підприємствах ТОВ СП «Грантех» (м. Київ) з економічним ефектом 120 тис. грн.

Особистий внесок здобувача полягає у огляді літературних джерел та їх аналізі, постановці завдання досліджень, розробці методики досліджень, зборі статистичної інформації, її обробці, розробленні методу теоретичного дослідження процесу гранулювання дисперсних матеріалів екструзією, проведенні обчислювальних експериментів по дослідженню впливу конструктивно-технологічних параметрів вузла пресування на закономірності процесу пресування, визначенні оптимальних конструктивно - технологічних параметрів вузла пресування, відпрацюванні рекомендацій для конструювання вузла пресування гранулятора, які враховують реологічні характеристики дисперсних матеріалів; розробленні оригінальної методики визначення реологічних властивостей досліджуваних дисперсних матеріалів, проведенні дослідження щодо знаходження закономірностей впливу температури на процес пресування дисперсних мас; розробленні експериментальної методики для оцінки адекватності запропонованих теоретичних розробок.

Впровадження результатів дисертаційної роботи здійснювалась колективом наукових співробітників при безпосередній участі здобувача. Усі винаходи, що зроблені в ході виконання роботи, є результатом колективної творчості і базуються на результатах досліджень здобувача. Конкретний внесок здобувача в наукових працях, що опубліковані у співавторстві наведено у списку основних опублікованих праць за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідались на 72-й науковій конференції студентів, аспірантів і молодих вчених (УДУХТ, Київ, 2006 р.), 73-78й, науковій конференції студентів, аспірантів і молодих вчених (НУХТ, Київ, 2007 – 2012 рр.), міжнародній Україно – польській науковій конференції молодих вчених «Механіка та інформатика» (Хмельницький, ХНУ 2005), міжнародній науковій

конференції молодих вчених (Одеса, 2006), XVIII міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, ХПІ 2010), міжнародній науково-практичній конференції «Инновационные технологии в производстве и переработке сельхоз продукции» Мінськ, БГАТУ, 2011р. та наукових семінарах кафедр факультету «Інженерної механіки та пакувальної техніки» НУХТ.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 15 робіт, з них 9 статті у фахових виданнях, 4 патенти України.

Структура дисертації. Робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку із 130 бібліографічних джерел та 5 додатків. Робота викладена на 165 сторінках машинописного тексту, містить 99 рисунків та 48 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, показано зв'язок роботи з науковими програмами і темами, сформульовано мету та основні завдання досліджень, наведено наукова новизна, практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача, інформацію про апробацію результатів дисертації та основні публікації.

У **першому розділі** наведено аналіз літературних джерел присвячених визначенню основних параметрів, що впливають на процес гранулювання ДМ екструзією.

Показано, що проектування технологічного обладнання для гранулювання ДМ екструзією, в сучасних умовах, доцільно проводити з використанням інформаційних технологій проектування (ІТТ).

Відмічено, що для аналізу взаємовпливу більшості конструктивно-технологічних параметрів процесів гранулювання екструзією доцільно використовувати ІТТ основані на методах математичного моделювання.

Показано, що одним з ключових питань, від якого в значній мірі залежить адекватність результатів математичного моделювання є відомості про структурно-механічні та реологічні властивості ДМ (Ребіндер П.А., Мачіхін Ю.А., Горбатов О.С. та ін.), що є сировиною у технологіях гранулювання.

Відмічено, що вплив температури на щільність паливних гранул в процесі гранулювання екструзією є недостатньо вивченим. Проте, деякі висновки про вплив температури на процес ущільнення дисперсної сировини, можна зробити проаналізувавши аналогічні залежності щодо її складових: целюлоза, геміцелюлоза та лігнін.

Проведено ґрунтовний аналіз робіт присвячених питанням параметричної оптимізації. З точки зору вибору раціонального алгоритму для вирішення задачі пошуку оптимального розподілу конструктивно-технологічних параметрів процесу гранулювання екструзією дисперсних матеріалів, проаналізовано роботи Хансена (Hansen), Тортореллі (Tortorelli), Грюбеля (Grübel), Бестле, Еберхарда, Шилена (W. Schiehlen) та ін..

Таким чином, доведено доцільність використання інформаційних технологій проектування при конструюванні обладнання для гранулювання ДМ екструзією, що, як правило, пов'язані з необхідністю вибору найбільш раціонального варіанту з

багатьох можливих. Рішення цієї проблеми стає можливим завдяки постановці та розв'язку задачі оптимізації.

Другий розділ присвячений дослідженню закономірностей впливу температури сировини в каналі прес-матриці на якість (густина) гранули при гранулюванні ДМ екструзією.

На базі гідравлічного пресу 2135 – 1М розроблена дослідна установка основою якої є циліндрична прес-матриця з пуансоном. Конструкція установки дозволяє варіювання тисків в межах від 25 до 300 МПа та температур від 20 до 200 °С.

Комплекс експериментів по дослідженню ДМ (стружка сосни, стружка дуба, лушпиння соняшника, лушпиння гречки, солома, висівки) показав, що при збільшенні температури сировини в прес-матриці до 150°С здатність до компактування досліджуваних ДМ зростає, подальше підвищення температури поступово погіршує якість (густина) гранул (рис.1). Це підтверджує відомий фізико-хімічний механізм зміни властивостей ДМ, що обумовлений, насамперед, розчиненням лігніну під впливом підвищення температури. При відносно низьких температурах процесу (до 150°С) переважними є реакції гідролітичного розкладання вуглеводів сировини й часткова деполімеризація лігніну з утворенням низькомолекулярних фрагментів. Підвищення температури процесу підсилює ступінь деструкції вуглеводів, а з реакціями деполімеризації лігніну починають конкурувати реакції його реполімеризації.

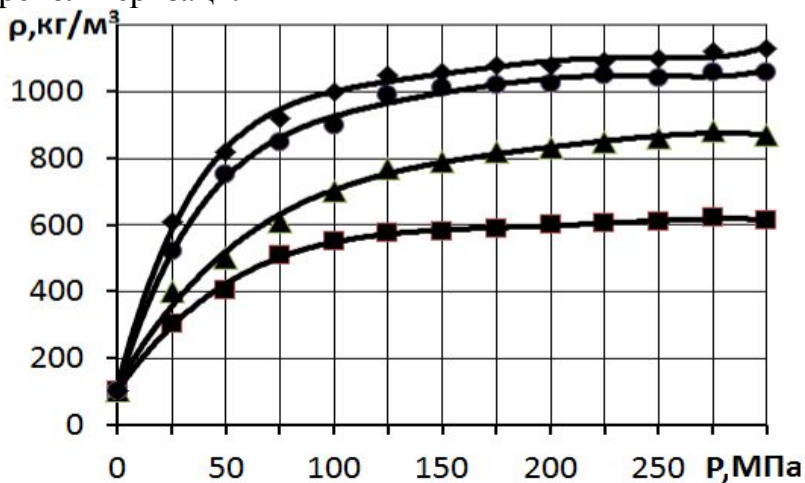


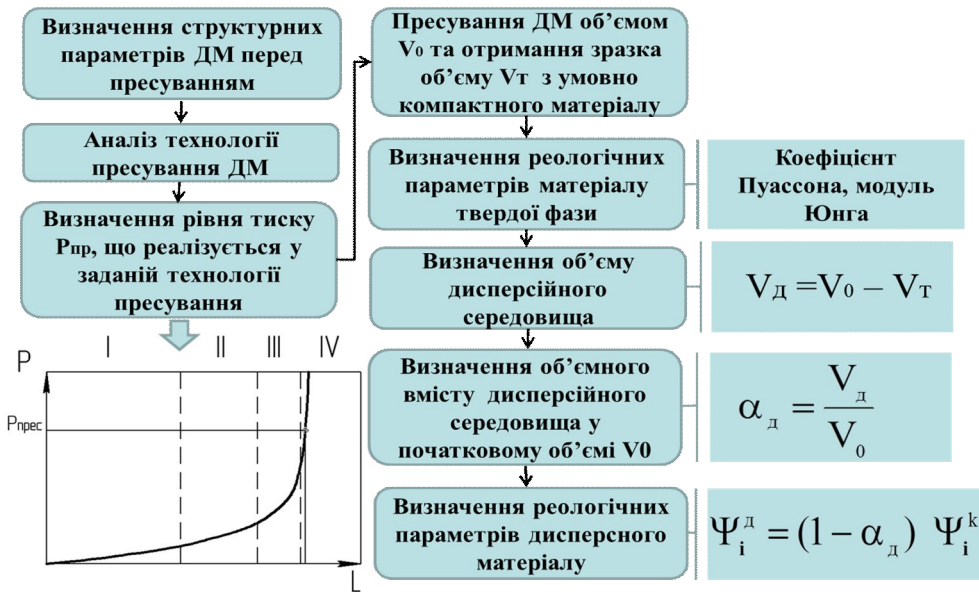
Рис. 1. Графіки залежності густини гранули ρ , кг/м³ від тиску пресування P , МПа в залежності від температури t °С:
 ■ - $t=20^\circ\text{C}$; ▲ - $t=80^\circ\text{C}$;
 ◆ - $t=140^\circ\text{C}$; ● - $t=180^\circ\text{C}$

Таким чином, результати проведених досліджень дозволили визначити раціональний, для компактування досліджуваних ДМ, діапазон температур 140-160°С.

Третій розділ присвячено розробці методу визначення реологічних параметрів твердої фази дисперсних матеріалів рослинного походження.

Для ефективного застосування методів математичного моделювання процесу пресування екструзією необхідно враховувати реологічні особливості ДМ, що обробляються, в першу чергу, модуль пружності та коефіцієнт Пуассона.

В основу запропонованого методу (рис.2) покладено експериментальні дослідження з використанням спеціального пресуючого обладнання, яке забезпечує високий тиск (400-500МПа) ущільнення ДМ до стану з незначним (в ідеалі наближеним до нуля) об'ємним вмістом газорідної фази. Отриманий в результаті матеріал можна умовно вважати компактним (однофазним), тобто матеріалом твердої фази досліджуваного ДМ.



Згідно наведеної методики, отримано набір зразків, що представляють собою тверду фазу лузги соняшника та гречки, стружки сосни та дуба, соломи та висівок.

Проведено експериментальні випробування цих зразків з метою визначення модуля пружності та коефіцієнта Пуассона матеріалу твердої фази. Для експериментальних випробувань було використано універсальну випробувальну машину TIRATEST-2151 (рис.3).

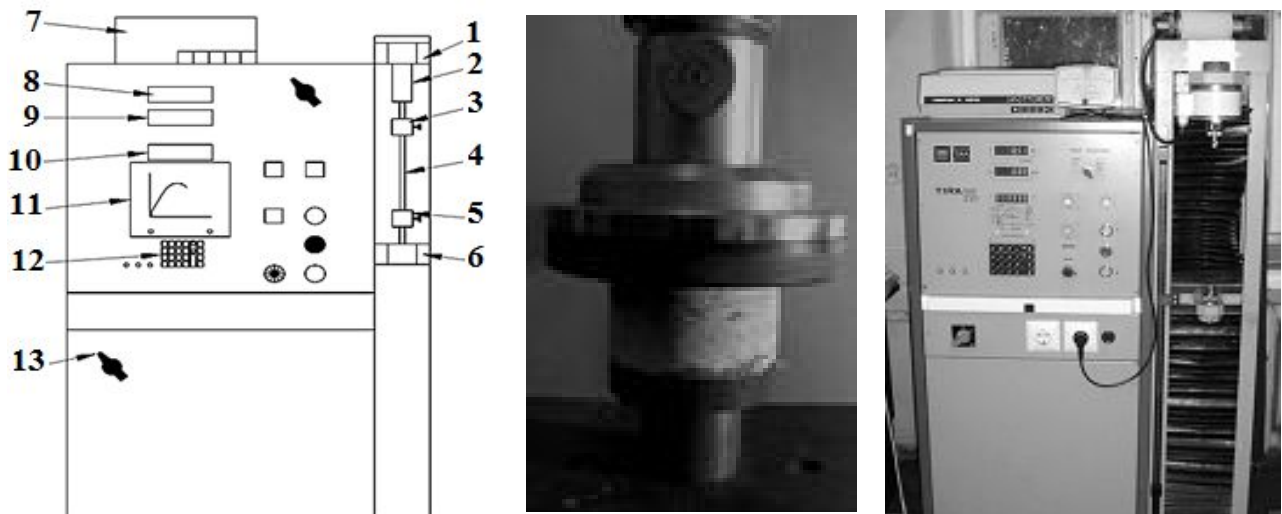
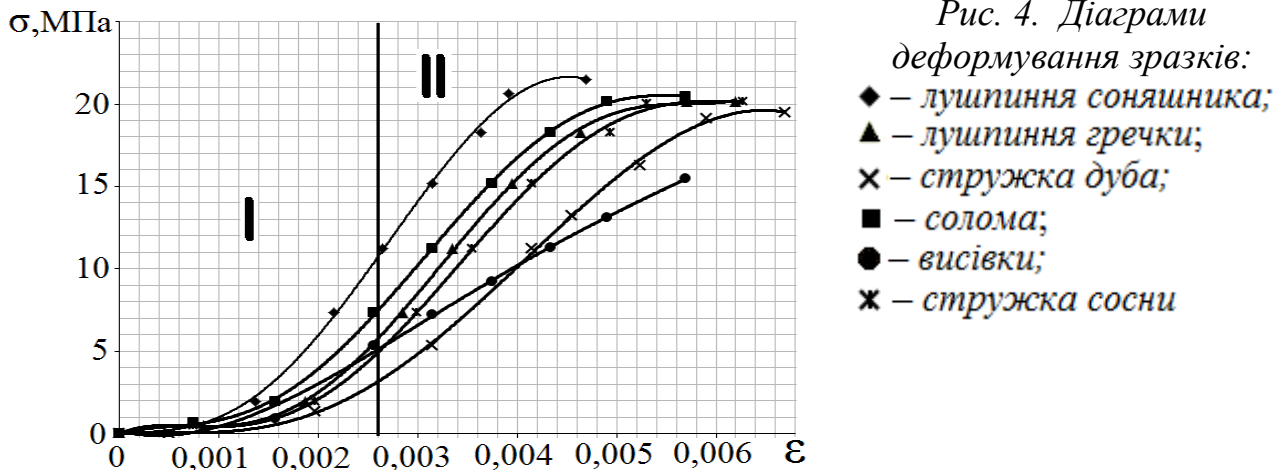


Рис.3. Загальний вигляд випробувальної машини TIRATEST—2151

1-нерухома траверса; 2-динамометр; 3-нерухомий затискувач; 4-зразок; 5-рухомий затискувач; 6-рухома траверса; 7-пристрій для друкування; 8-табло індикації сили P , (Н); 9-табло індикації деформації ΔL , (мм); 10- табло індикації даних вводу та виводу; 11- шаблон; 12-клавіатура; 13-ручка для вмикання

Зразки піддавали стиску, фіксуючи величину переміщення рухомої траверси 6 по показникам табло індикації деформації 9 та, за допомогою динамометра 2, фіксували значення сили стискання по табло індикації сили 8, потім дані виводили на пристрій для друкування 7 для отримання діаграми деформування (рис.4). Отримані залежності показують, що досліджувані матеріали є нелінійно пружними. На першій ділянці модуль Юнга є змінним в залежності від

прикладеного навантаження, на даній ділянці проходить поступове зникнення пор (мікрозазорів) між частинками дисперсної фази, що утворились в результаті часткової релаксації матеріалу. На другій ділянці, характер якої близький до лінійного, величина модуля Юнга залишається сталою (погрішність в межах 5% - 15%), на ділянці відбувається деформування безпосередньо дисперсної фази. Для подальшого використання в математичній моделі обрано значення модуля Юнга, отримані саме на другій ділянці, оскільки робочі тиски, при яких відбувається процес гранулювання екструзією, відповідають (рівні або вищі) тискам на вказаній ділянці.



За записаними діаграмами деформування були визначені E , МПа - модулі пружності всіх досліджуваних зразків.

Для визначення коефіцієнта Пуассона проводили вимірювання геометричних розмірів зразка до навантаження та після.

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|, \text{ де } \varepsilon' - \text{деформація в поперечному напрямку, } \varepsilon - \text{повздовжня деформація.}$$

Також були проведені експерименти по визначенню коефіцієнта тертя досліджуваних ДМ по контактній поверхні отворів прес-матриці (при змінній шорсткості обробки поверхонь: Ra 0,2-12,5).

Проведений комплекс натурних експериментів дозволив встановити точні значення (табл. 1) вхідних параметрів розробленої математичної моделі.

Таблиця 1

Результати вимірювань для твердої фази досліджуваних зразків

№ п/п	Тип сировини досліджуваного зразка	Коефіцієнт Пуассона	Коефіцієнт тертя (Ra 1,25)	Модуль пружності E , ГПа
1	Лушпиння соняшника	0.125	0.321	3.4407
2	Стружка сосни	0.118	0.265	2.6804
3	Лушпиння гречки	0.123	0.365	3.1254
4	Стружка дуба	0.127	0.341	2.9874
5	Солома	0.124	0.276	3.1584
6	Висівки	0.134	0.292	2.1458

Четвертий розділ роботи присвячений розробці методу визначення оптимальних конструктивно - технологічних параметрів вузла пресування гранулятора.

Схематично запропонований метод представлено на рис.5.

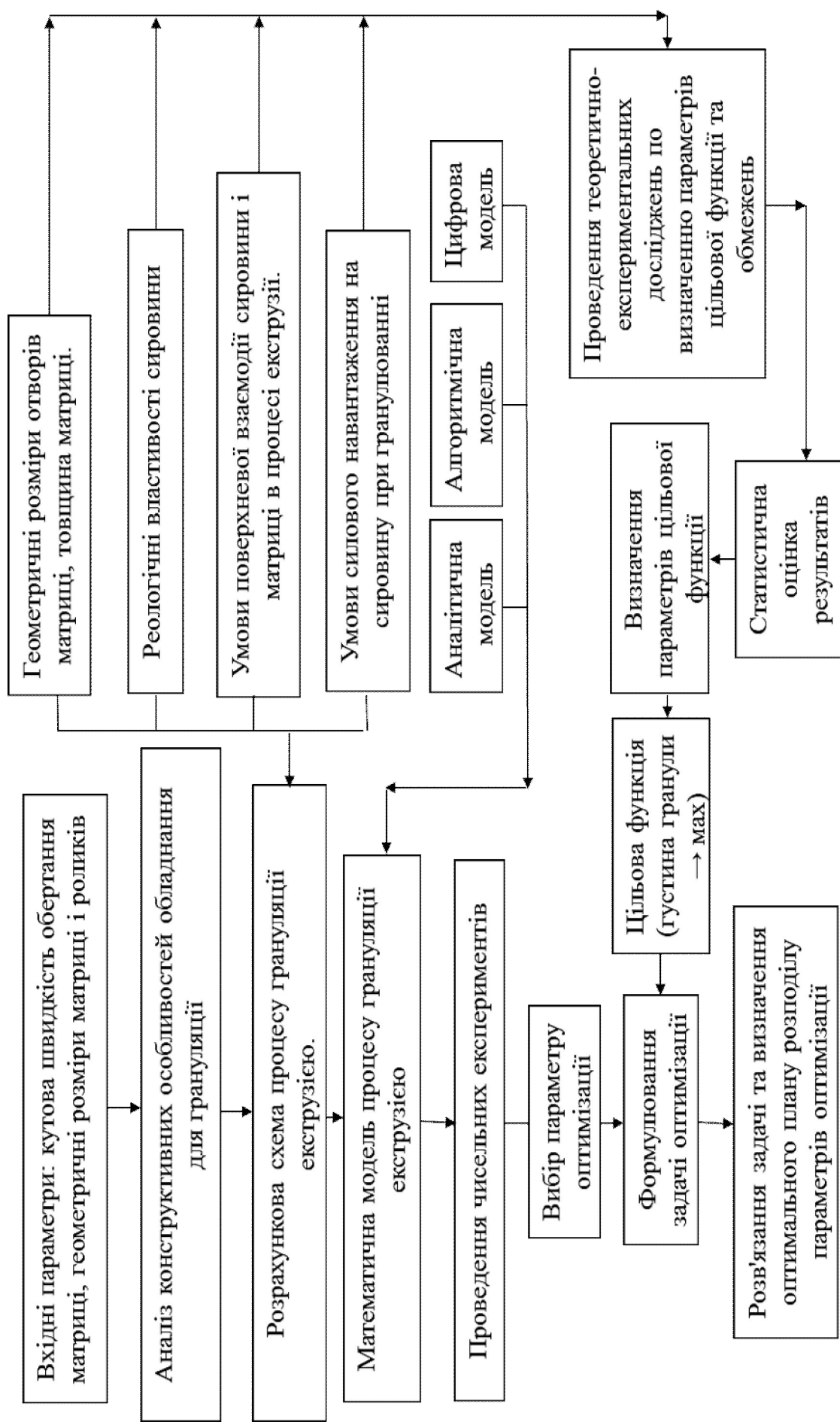


Рис. 5. Схема визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів процесу грануляції дисперсних матеріалів уцільненням

Розглянуто типову схему гранулювання екструзією, в якій пресуючий ролик розташований усередині кільцевої матриці (рис.6). Ключова технологічна операція відбувається в пресуючому вузлі гранулятора - це операція гранулювання екструзією сировини через отвори в матриці. На рис. 7. представлені розрахункові схеми процесу гранулювання екструзією.

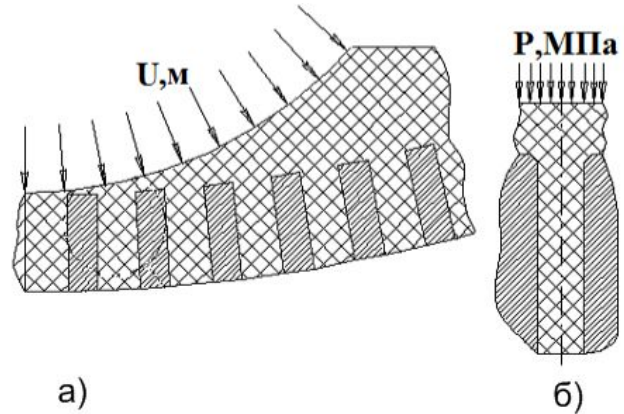
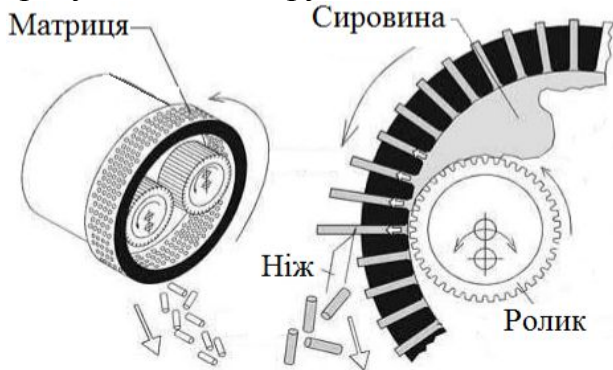


Рис.6. Схема роботи вузла пресування гранулятора. Рис. 7. Розрахункові схеми процесу гранулювання екструзією.

Розрахункова схема рис. 7(а) представляє собою частину матриці гранулятора з отворами, сировина обмежена в верхній частині пресуючим роликом. Схема враховує геометрію як матриці гранулятора (її діаметр, та відстань між отворами) так і діаметр пресуючого ролика і відстань (зазор) між матрицею гранулятора та пресуючим роликом. Для врахування геометричних розмірів каналу: довжини, діаметру, величини фаски, розроблено розрахункову схему, що наведена на рис.7(б).

Розроблена математична модель складається з аналітичної, алгоритмічної та цифрової. Структура аналітичної моделі:

1) Описання закономірностей нерівноважних процесів деформування дисперсних матеріалів у режимі пружно-пластичної течії твердої фази. При розгляданні конкретної переробної технології використовується концепція представлення ДМ як двохфазних сумішей пористої або зернистої твердої деформованої структури з рідиною або газом. Для опису поведінки ДМ використані поняття напружень, деформацій, щільності та їх градієнтів.

2) Побудова аналітичної залежності між конструктивно-технологічними параметрами вузла пресування гранулятора на основі математико-статистичного аналізу результатів обчислювальних експериментів по дослідженню процесу гранулювання у межах запропонованих розрахункових схем. При цьому найбільш раціональним методом можна вважати регресійний аналіз досліджуваних функцій. Це дозволяє на основі обробки експериментальних даних отримати вірогідні значення функції при введенні в модель всіх основних факторів впливу. Планування багатфакторного експерименту виду 2^3 здійснювали методом центрального композиційного ортогонального плану (ЦКОП). Отримані регресійні моделі 2-го порядку з ефектами взаємодії 1-го порядку.

3) Формулювання задачі пошуку оптимального розподілу конструктивно-технологічних параметрів вузла пресування гранулятора на основі методів математичного програмування. Ефективність роботи преса-гранулятора оцінюється

по якості (густині) $\rho(\mathbf{u})$ гранул, а також продуктивності $Q(\mathbf{u})$ гранулятора і енергоємності (потужності) $W(\mathbf{u})$ привода гранулятора. Введемо наступні критерії оптимізації: густина гранул $\rho(\mathbf{u}) \rightarrow \max$; енергоємність (потужність) $W(\mathbf{u}) \rightarrow \min$; продуктивність $Q(\mathbf{u}) \rightarrow \max$; при керуючих параметрах \mathbf{u} : L (довжина отворів), d (діаметр отворів матриці гранулятора) та P (тиск пресування); та обмеженнях: $a \leq L \leq a_1$, $a_2 \leq d \leq a_3$, $a_4 \leq P \leq a_5$. Подібний вибір керуючих параметрів впливає з аналізу проведених досліджень впливу геометричних характеристик пресуючого вузла гранулятора на густину гранули.

Таким чином, задача оптимізації має наступний вигляд:

$$\rho(L, d, P) \rightarrow \max \quad (1)$$

$$W(L, d, P) \rightarrow \min \quad (2)$$

$$Q(L, d, P) \rightarrow \max \quad (3)$$

при $a \leq L \leq a_1$, $a_2 \leq d \leq a_3$, $a_4 \leq P \leq a_5$.

З метою підвищення ефективності отриманих результатів запропоновано два способи розв'язку поставленої задачі оптимізації (1)-(3): спрощення до одноцільової та пошуку компромісного рішення.

Згідно першого способу, зведемо багатоцільову задачу до одноцільової тобто використаємо цільові функції (2) та (3) в якості обмежень для загальної задачі оптимізації: $W(L, d, P) \leq W_{ep}$; $Q(L, d, P) \geq Q_{ep}$, де W_{ep} та Q_{ep} – максимальна можлива потужність та мінімальна можлива продуктивність гранулятора.

Другий спосіб – розв'язок задачі компромісу (проблема багатокритеріальності) – тобто вибору рішення при наявності множини цільових функцій (1)–(3): $f = \{f_i(\alpha)\}$ ($i=1, 2, \dots, M$), де α альтернатива, під якою розуміють безперервну векторну змінну, що належить випуклій замкнутій області, яка, зазвичай, задається системою нерівностей. В нашому випадку критерії (1)–(3) множини f мають різний фізичний зміст, а також одні з них мінімізуються, а інші максимізуються. Відмітимо, що якщо α^0 ефективна альтернатива множини критеріїв $f = \{f_i(\alpha)\}$ ($i=1, 2, \dots, M$), то α^0 - ефективна альтернатива множини функцій $\psi = \{\omega_i(f_i(\alpha))\}$ ($i=1, 2, \dots, M$), де $\omega_i(f_i(\alpha))$ монотонна функція $f_i(\alpha)$. Для знаходження ефективних точок перетворимо функції $\omega_i(f_i(\alpha))$ на безрозмірні та такі що $\omega_i(f_i(\alpha)) \rightarrow \min$.

Для критеріїв, що максимізуються:

$$\omega_i(f_i(\alpha)) = \frac{f_i^0 - f_i(\alpha)}{f_i^0 - f_i(\min)}, i = 1, \dots, m. \quad (4)$$

Для критеріїв, що мінімізуються:

$$\omega_i(f_i(\alpha)) = \frac{f_i(\alpha) - f_i^0}{f_i(\max) - f_i^0}, i = m + 1, \dots, M. \quad (5)$$

де f_i^0 – оптимальне значення i -го критерію, $f_i(\min)$ - найменше значення максимізуючого критерію, $f_i(\max)$ - найбільше значення мінімізуючого критерію.

Отже, необхідно розв'язати параметричну задачу:

$$\min \psi(\alpha) = \min_{\substack{\alpha \in U \\ \alpha \in V}} \left\{ \sum_{i=1}^m \gamma_i \frac{f_i^0 - f_i(\alpha)}{f_i^0 - f_i(\min)} + \sum_{i=m+1}^M \gamma_i \frac{f_i(\alpha) - f_i^0}{f_i(\max) - f_i^0} \right\}, \quad (6)$$

для всіх $\gamma_i \in \Gamma^+ \left\{ \gamma_i > 0, \sum_{i=m+1}^M \gamma_i = 1 \right\}$.

Використаємо підхід при якому під компромісним розв'язком розуміють такий, що дає мінімальне відносне відхилення від оптимальних значень параметрів по всім критеріям в залежності від вагових коефіцієнтів γ_i , таких, що $\gamma_i \in \Gamma^+ \left\{ \gamma_i > 0, \sum_{i=m+1}^M \gamma_i = 1 \right\}$.

Алгоритмічна модель складається з таких основних частин:

- розв'язок крайової задачі нерівноважного деформування ДМ, що оснований на принципі розкріплення проекційно-сітковими методами: скінченних елементів (МСЕ) за просторовими змінними та скінченних різниць (МСР) за часовим аргументом;
- обчислювальні алгоритми, що реалізують реологічні процеси при пресуванні дисперсного матеріалу;
- обчислювальні алгоритми, які реалізують кінематичні особливості процесу пресування дисперсного матеріалу;
- алгоритми, що реалізують метод рівнянь регресії;
- алгоритми розв'язання задачі оптимізації основані на LMA(Levenberg–Marquardt algorithm).

Алгоритмічна модель реалізована у вигляді програмно-інструментальної системи PLAST–ОПТ (цифрова модель), що складається з наступних підсистем:

I. Підсистема PLAST–GRN

- a) графічний редактор для створення геометричної моделі;
- b) сітковий генератор для автоматизованого генерування скінченно-елементної моделі;
- c) блок завдання граничних та початкових умов згідно розрахункової схеми;
- d) обчислюваного процесора, що реалізує режими деформування ДМ з відповідними розрахунками технологічних параметрів (YPPOR.exe, YVPPOR.exe);
- e) блок візуалізації результатів розрахунків у вигляді кольорової карти досліджуваних функцій;
- f) база даних для зберігання результатів обчислювальних експериментів;

II. Підсистема REGRES(ЦКОП)

- a) блок завдання незалежних змінних та меж варіювання факторів;
- b) блок введення результатів обчислювальних експериментів з архіву підсистеми PLAST–GRN;
- c) блок математико-статистичної обробки (regres.exe);
- d) база даних для зберігання результатів математико-статистичного аналізу;

III. Підсистема ОПТИМУМ

- a) блок завдання параметрів та критеріїв оптимізації;
- b) блок встановлення обмежень на параметри оптимізації;

- с) блок введення результатів математико-статистичного аналізу обчислювальних експериментів з архіву підсистеми REGRES(ЦКОП);
- д) обчислювальний процесор, що реалізує розв'язання одноцільової задачі оптимізації основуючись на LMA алгоритмі (opt.cmd);
- е) обчислювальний процесор, що реалізує розв'язання задачі пошуку компромісу основуючись на LMA алгоритмі (kompromis.cmd);
- ф) база даних оптимального розподілу конструктивно-технологічних параметрів вузла пресування гранулятора.

Представлені методичні та інструментальні розробки утворюють інтелектуально-експертну систему (ІЕС) призначену для визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів вузла пресування гранулятора. Використання ІЕС дозволяє:

- встановити вплив конструктивних параметрів вузла пресування гранулятора на якість кінцевого продукту, тобто провести дослідження закономірностей пресування гранули з ДМ в процесі його екструзії.
- провести математико-статистичну обробку результатів дослідження закономірностей пресування гранули з ДМ. Отримати рівняння регресії.
- розв'язати задачу визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів процесу грануляції ДМ ущільненням.

У **п'ятому розділі** наведено практичне використання розроблених методологічних та інструментальних розробок для визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів вузла пресування гранулятора ГТ-420.

Згідно розрахункових схем (рис. 7), проведено комплекс обчислювальних експериментів по дослідженню зміни густини гранул в залежності від конструктивних параметрів вузла пресування гранулятора, тиску пресування та реологічних властивостей сировини. Вирішення цієї задачі здійснено на основі аналізу розподілу напружень в об'ємі матеріалу, визначення області пластичних деформацій в об'ємі деформованого матеріалу, ущільнення матеріалу та ін. (рис.8, 9).

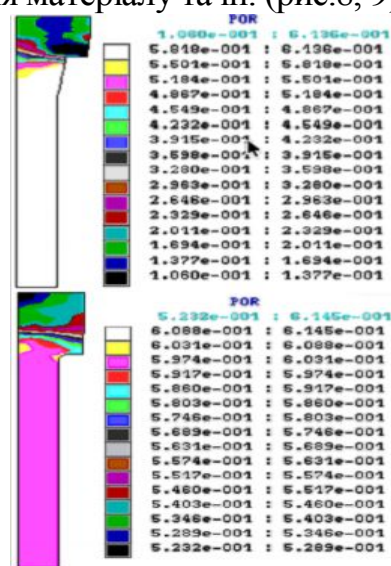
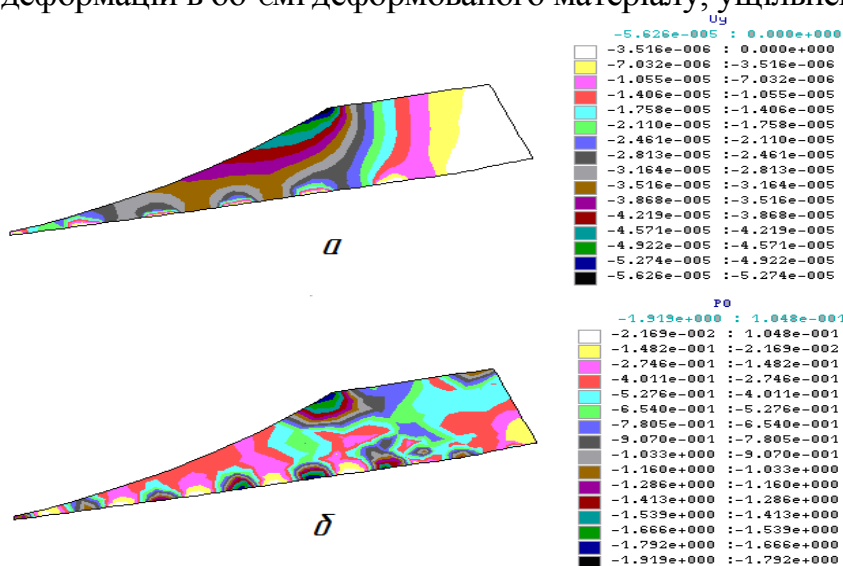


Рис. 8. Схема розподілення переміщень (а) та розподілення тиску (б) в об'ємі ДМ.

Рис.9. Схема розподілення пористості в об'ємі ДМ.

Побудовано графіки залежності густини гранул від основних конструктивно-технологічних параметрів вузла пресування гранулятора при різних тисках пресування. Так для лушпиння соняшника маємо залежності, що наведені на (рис.10).

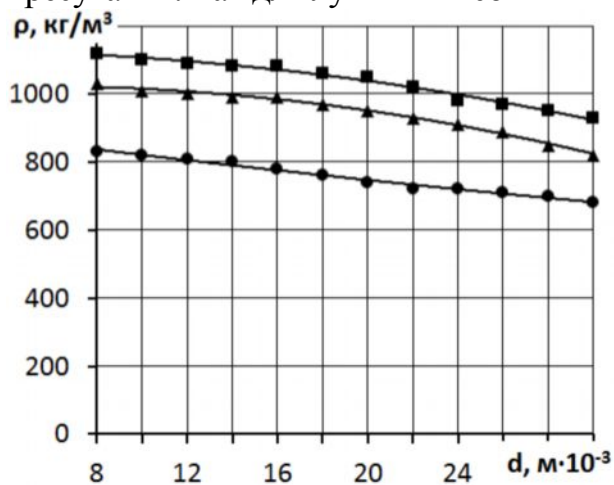


Рис.10.а. Залежність густини гранули ρ від діаметру d отвору:

● - 50МПа, ■ - 100МПа, ▲ - 150МПа

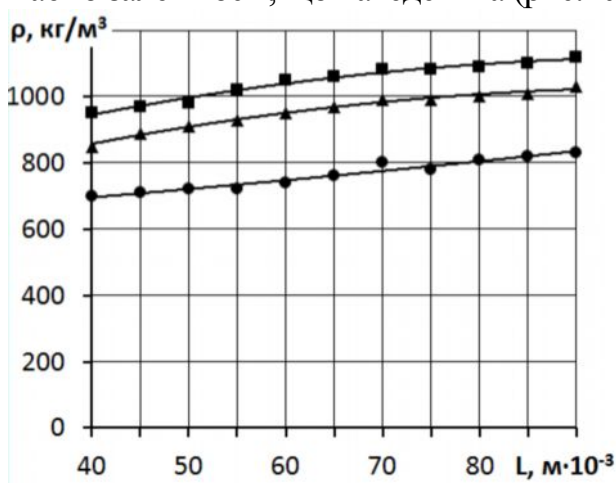


Рис.10.б. Залежність густини гранули ρ від довжини L отвору матриці:

● - 50МПа, ■ - 100МПа, ▲ - 150МПа

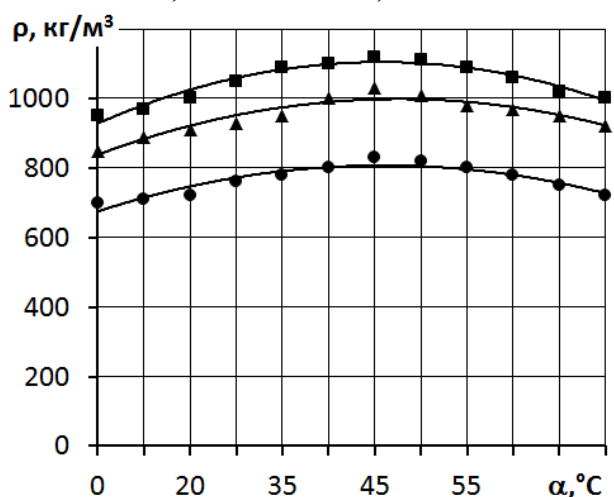


Рис.10.в. Залежність густини гранули ρ від кута α отвору матриці

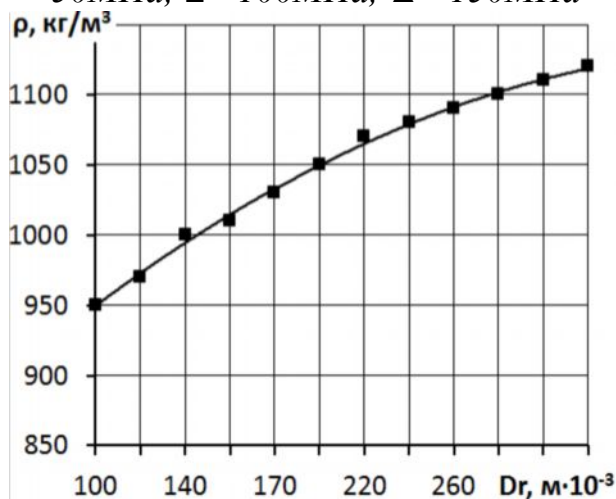


Рис.10.г. Залежність густини гранули ρ від діаметра D_r ролика

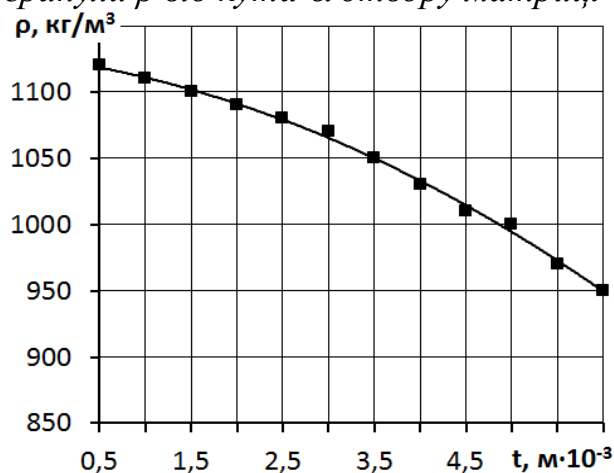


Рис.10.д. Залежність густини гранули ρ від величини зазору t між роликом та матрицею

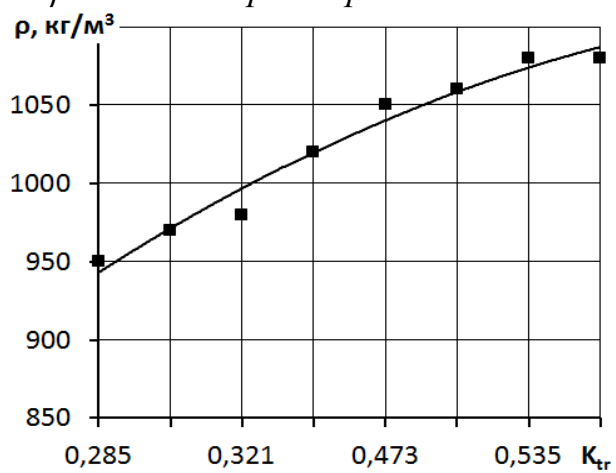


Рис.10.е. Залежність густини гранули ρ від коефіцієнта тертя між ДМ та матрицею

Оброблення результатів обчислювальних експериментів методами математико-статистичного аналізу (МСА) дозволило отримати аналітичні співвідношення між конструктивно-технологічними параметрами вузла пресування гранулятора.

Ці співвідношення для лушпиння соняшника представлено на рис.11 та рис.12. Аналогічні співвідношення отримано для лушпиння гречки, стружки сосни та дуба, соломи та висівок.

Використання отриманих залежностей дозволило конкретизувати та розв'язати задачу оптимізації (1)-(3) рис. 11 та рис. 12 (приклад: сировина – лушпиння соняшника).

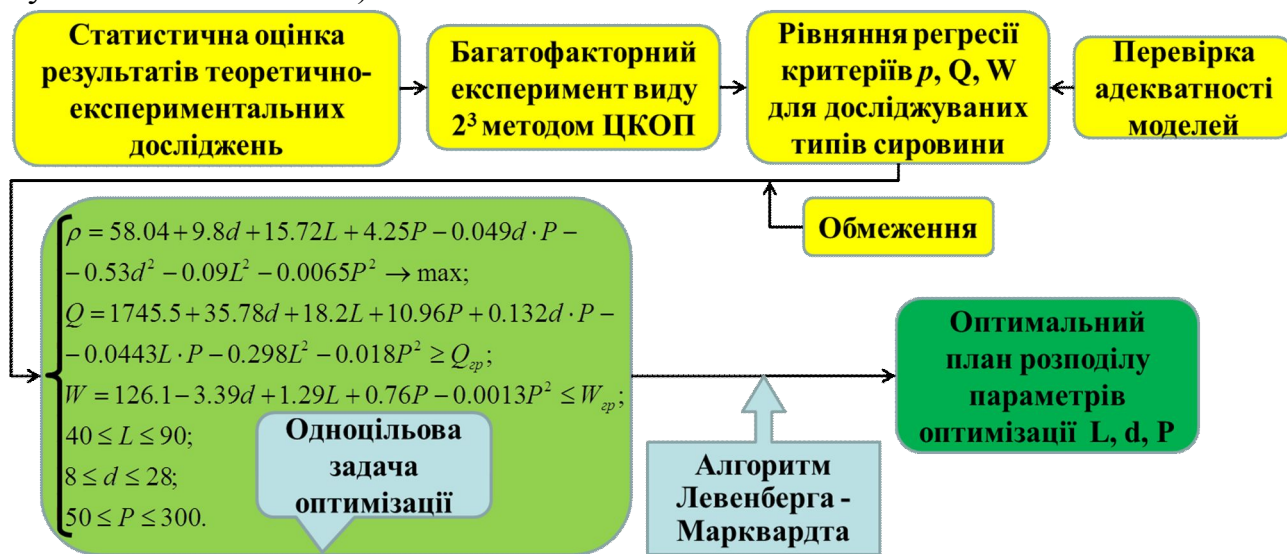


Рис. 11. Схема розв'язку одноцільової задачі оптимізації.

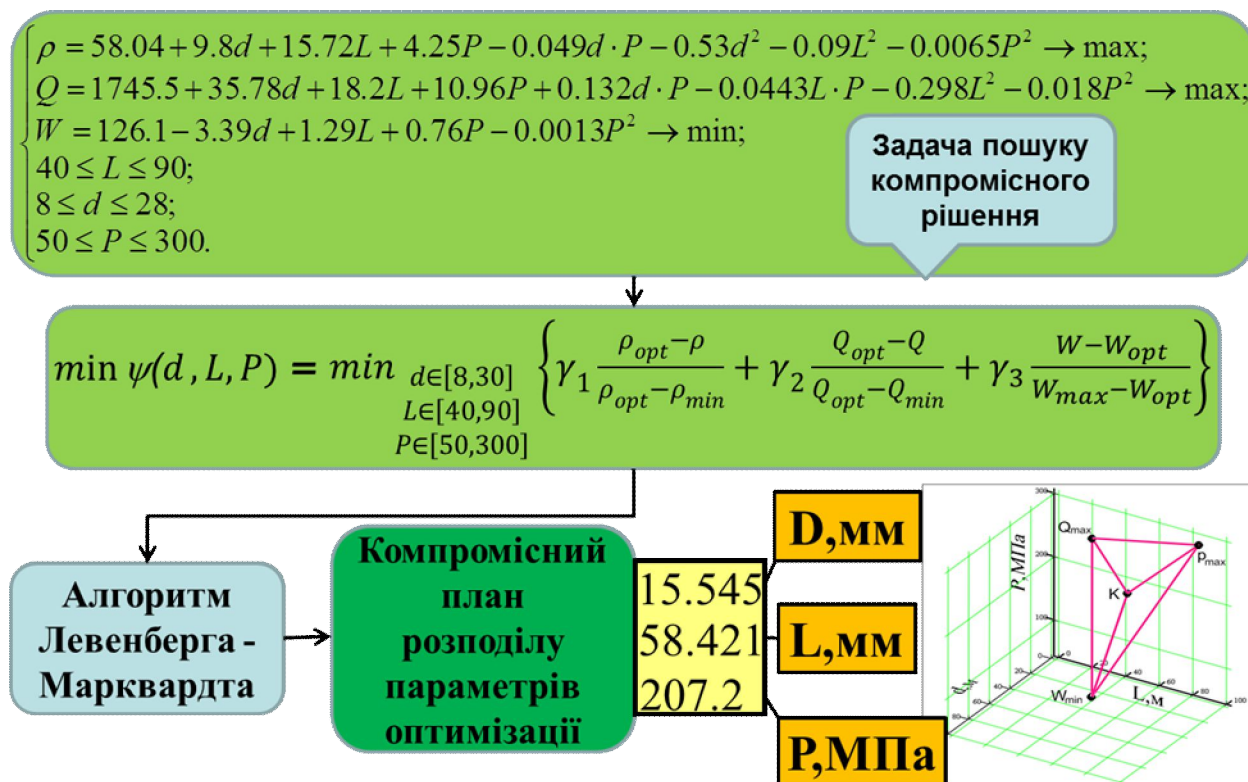


Рис. 12. Схема розв'язку задачі компромісу.

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі проведено комплекс дослідів по аналізу закономірностей пресування дисперсних матеріалів. Аналіз отриманих результатів свідчить, що розбіжність теоретичних результатів з даними експериментів оцінюється межею 29%.

У **додатках** наведено протоколи випробувань, документи, що підтверджують впровадження результатів досліджень та допоміжні розрахунки.

ВИСНОВКИ

Головний результат дисертаційної роботи полягає в дослідженні процесу гранулювання дисперсних мас (лузга соняшника та гречки, солома, висівки, деревна стружка та ін.) і розробці ІТП обладнання для обробки дисперсних матеріалів екструзією та використання розробленої ІТП при проектуванні вузла пресування гранулятора з оптимальними конструктивно-технологічними параметрами в технології гранулювання біомаси при виробництві паливних гранул.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Розроблено методику визначення оптимальних конструктивно - технологічних параметрів вузла пресування гранулятора. На основі аналізу конструктивних особливостей процесу грануляції та показників якості запропоновано задачу оптимізації, що полягає у визначенні конструктивно - технологічних параметрів, які забезпечують максимальну густину гранул.
2. Створено методику визначення реологічних параметрів досліджуваних дисперсних матеріалів. Проведено комплекс стендових натурних випробувань зразків пресованої біомаси та визначено модулі пружності та коефіцієнти Пуассона для твердої фази досліджуваних зразків виготовлених з лузги соняшника та гречки, стружки сосни та дуба, соломи та висівок.
3. Отримано значення коефіцієнтів тертя для зразків виготовлених з лузги соняшника та гречки, стружки сосни та дуба, соломи та висівок по контактним поверхням з різною шорсткістю.
4. Досліджено вплив конструктивних параметрів вузла пресування гранулятора на густину гранул.
5. Досліджено вплив температури на процес гранулювання дисперсних мас екструзією. Згідно результатів проведених дослідів, визначено, що для проведення процесу гранулювання досліджуваних дисперсних матеріалів, раціональною є температура 130 – 160 °С.
6. На основі проведених обчислювальних експериментів визначено оптимальні конструктивно – технологічні параметри вузла пресування гранулятора ГТ-420 для різних типів сировини.
7. Шляхом фізичного моделювання доведено адекватність проведених теоретичних досліджень. Згідно проведених розрахунків похибка не перевищує 29%.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Риндюк Д. В. Розробка метода визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів преса-гранулятора / Д. В. Риндюк, Є. В. Штефан // Наукові праці ОНАХТ.- Одеса: 2006.-Вип.28.-Т.2.-С. 202-205.

Особистий внесок здобувача – розробив методику визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів преса-гранулятора.

2. Штефан Є. В. Гранулювання комбікормів методом холодної екструзії / Є.В. Штефан, Ю. О. Заєць, Д. В. Риндюк // Зерно і хліб.–2006.– №4(44).– С.52.

Особистий внесок здобувача – розробив методику досліджень.

3. Штефан Є. В. Експериментальний метод дослідження реологічних властивостей органічних матеріалів - відходів зернової промисловості / Є. В. Штефан, Д. В. Риндюк // Наукові праці НУХТ.–2008.–№25,42.–С.106-108.

Особистий внесок здобувача – розробив методику дослідження реологічних властивостей органічних матеріалів.

4. Риндюк Д. В. Методика визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів процесу грануляції дисперсних матеріалів ущільненням / Д. В. Риндюк, Є. В. Штефан // Обладнання та технології харчових виробництв: Темат.сб.наук.пр.– Донецьк: Нац. Ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського, 2009.-Вип.22.-С.295-300.

Особистий внесок здобувача – розробив математичну модель визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів процесу грануляції дисперсних матеріалів ущільненням.

5. Штефан Е. В. Використання математичного моделювання при проектуванні вузла пресування гранулятора / Є. В. Штефан, Д. В. Риндюк // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. Збірник. наук. праць. Тематичний випуск Інформатика і моделювання. - Харків: НТУ „ХПІ”, 2010.-№31.- С.191-200.

Особистий внесок здобувача – провів розрахунки та отримав оптимальний розподіл параметрів оптимізації.

6. Штефан Є. В. Дослідження структурно-механічних властивостей дисперсних матеріалів рослинного походження / Є. В. Штефан, Д. В. Риндюк, О. В. Таран // Вісник Вінницького національного аграрного університету. Збірник. наук. праць. Серія: Технічні науки. – Вінниця: №10 т.1. 2012 р. – с. 181-187.

Особистий внесок здобувача – запропонував оригінальну методику та отримав дані щодо модуля пружності та коефіцієнта Пуассона ряду дисперсних матеріалів.

7. Штефан Е. В. Исследование влияния температуры на процесс прессования дисперсных материалов / Е. В. Штефан, Д. В. Риндюк // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. Збірник. наук. праць. Тематичний випуск «Хімія, хімічна технологія та екологія». - Харків: НТУ „ХПІ”, 2010.-№65.- С.114-118.

Особистий внесок здобувача – отримав діапазон температур

раціональних для проведення процесу пресування конкретної сировини.

8. Черноусенко Е. В. Оценка малоциклового усталости паровой турбины К-200-130-3 с применением программного комплекса ANSYS и COSMOS / О. Ю. Черноусенко, Е. В. Штефан, Д. В. Рындюк, Д. С. Третьяк // Энергетика та електрифікація.-2008.-№3.-С.42-48.

Особистий внесок здобувача – проведення чисельних експериментів.

9. Письменный Е. Н. Расчетное определение малоциклового усталости высокотемпературных элементов паровой турбины мощностью 200 МВт с применением программного комплекса ANSYS и COSMOS / Е.Н. Письменный, О. Ю. Черноусенко, Е. В. Штефан, Д. В. Рындюк, Д. С. Третьяк // Весник Национального технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Машиностроение.К.:НТУУ «КПІ».-2008-С.188-195.

Особистий внесок здобувача – проведення чисельних експериментів.

10. Литвиненко О. А. Комп'ютерне моделювання рідинних течій в кавітаційних пристроях / О. А. Литвиненко, Д. В. Риндюк // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XVIII міжнародної науково-практичної конференції, Ч.І (12-14 травня 2010 р., Харків) / за ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л. – Харків, НТУ «ХПІ». – с.305

Особистий внесок здобувача – проведення комп'ютерного моделювання рідинних течій.

11. Рындюк Д. В. Влияние температуры на процесс гранулирования экструзией / Д. В. Рындюк, Д. В. Крицкий // Инновационные технологии в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции : доклады Международной научно-практической конференции : Минск, 14–15 апреля 2011 г. / под общ. ред. В.Б. Ловкиса, А.А. Бренча, В.М. Позднякова. – В 2 ч. Ч. 2. – Минск : БГАТУ, 2011. – 288 с. ISBN 978-985-519-363-1.

Особистий внесок здобувача – проведення фізичних експериментів по дослідження впливу температури на процес гранулювання екструзією.

12. Пат. 30058 U Україна, МПК (2006) В01J2/00. Спосіб визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів преса-гранулятора / Штефан Є. В., Риндюк Д. В.; заявник і патентовласник НУХТ.–№ u200711256; заявл. 11.10.07; опубл. 11.02.08.– 2 с.

Особистий внесок здобувача – розробив спосіб визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів преса-гранулятора.

13. Пат. 62321 U Україна, МПК (2006.01) В01J 2/22. Спосіб виробництва паливних гранул / Риндюк Д. В., Крицький Д. В. ; заявник і патентовласник НУХТ.–№ u201100965; заявл. 28.01.2011; опубл. 25.08.2011.– 4 с.

Особистий внесок здобувача – розробив спосіб виробництва паливних гранул.

14. Пат. 63965 U Україна, МПК (2006.01) В01J 2/20. Гранулятор / Риндюк Д. В., Крицький Д. В. ; заявник і патентовласник НУХТ.–№ u201103816; заявл. 29.03.2011; опубл. 25.10.2011.– 4 с.

Особистий внесок здобувача – розробив конструкцію гранулятора.

15. Пат. 62324 У Україна, МПК (2006.01) В01J 2/20. Гранулятор / Риндюк Д. В., Крицький Д. В. ; заявник і патентовласник НУХТ.–№ u201100969; заявл. 28.01.2011; опубл. 25.08.2011.– 4 с.

Особистий внесок здобувача – розробив конструкцію гранулятора.

АНОТАЦІЯ

Риндюк Д. В. Розробка методу визначення оптимальних конструктивно – технологічних параметрів процесу гранулювання дисперсних матеріалів екструзією. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв. – Національний університет харчових технологій, Київ, 2012.

Дисертацію присвячено дослідженню процесу гранулювання дисперсних мас (лузга соняшника та гречки, солома, висівки, деревна стружка та ін.) і розробці інформаційної технології проектування (ІТП) обладнання для обробки дисперсних матеріалів екструзією та використання розробленої ІТП при проектуванні вузла пресування гранулятора в технології гранулювання біомаси при виробництві паливних гранул.

Згідно розробленої методики створена математична модель процесу гранулювання дисперсних матеріалів екструзією і на її основі запропоновано новий підхід до проектування вузла пресування гранулятора, також розроблено методику визначення реологічних властивостей досліджуваних дисперсних матеріалів, проведено дослідження щодо знаходження закономірностей впливу температури на процес пресування дисперсних мас, досліджено вплив технологічних факторів і конструктивних параметрів вузла пресування гранулятора на закономірності процесу пресування екструзією, з використанням розробленої методики визначенні оптимальні конструктивні параметри вузла пресування гранулятора.

Ключові слова: грануляція, вузол пресування, дисперсні матеріали, математична модель, реологічні параметри.

ABSTRACT

Ryndyuk D. Development of method for determining the optimal design - technological parameters of the process of extrusion granulation dispersed materials. - Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.18.12 - processes and equipment of food, microbiological and pharmaceutical industries. - National University of Food Technologies, Kyiv, 2012.

Thesis deals with the granulation of particulate mass (sunflower and buckwheat husk, straw, bran, wood chips, etc.) and the development of information technology design (ITP) processing equipment dispersed materials developed using extrusion and engineers in the design of the site in pellet pressing technology pelleting biomass the production of fuel pellets.

According developed technique created a mathematical model of dispersed materials granulation extrusion and on its basis, a new approach to design node

extrusion granulator also developed a method of determining the rheological properties of the dispersed material, conducted research on finding patterns of influence of temperature on the process of pressing disperse masses, the effect of technological factors and structural parameters of extrusion granulator unit on patterns extrusion pressing process, using the developed method for determining optimal design parameters node compaction granulator.

Keywords: granulation, pressing unit, dispersed materials, mathematical model, the rheological parameters.

АННОТАЦИЯ

Рындюк Д.В. Разработка метода определения оптимальных конструктивно - технологических параметров процесса гранулирования дисперсных материалов экструзией. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 - процессы и оборудования пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. - Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2012.

Диссертация посвящена исследованию процесса гранулирования дисперсных масс (лузга подсолнечника и гречки, солома, не пищевые отходы элеваторов, древесная стружка и др.) и разработке информационной технологии проектирования (ИТП) оборудования для обработки дисперсных материалов экструзией и использование разработанной ИТП при проектировании узла прессования гранулятора в технологии гранулирования биомассы при производстве топливных гранул.

Рассмотрено типовую схему гранулирования дисперсных материалов экструзией, в которой прессующий ролик расположен внутри кольцевой матрицы.

Согласно разработанной методике создана математическая модель процесса гранулирования дисперсных материалов экструзией. Математическая модель состоит из аналитической, алгоритмической и цифровой моделей.

Аналитическая модель основана на: положениях механики дисперсных материалов; математико-статистическом анализе результатов вычислительных экспериментов по исследованию процесса гранулирования в рамках предложенных расчетных схем; формулировании задачи поиска оптимального распределения конструктивно-технологических параметров узла прессования гранулятора с использованием методов математического программирования.

Алгоритмическая модель состоит из следующих основных частей: решение краевой задачи неравновесного деформирования дисперсных материалов, основанное на принципе раскрепления проекционно-сеточными методами; вычислительные алгоритмы, реализующие реологические процессы при прессовании дисперсного материала; вычислительные алгоритмы, реализующие кинематические особенности процесса прессования дисперсного материала; алгоритмы, реализующие метод уравнений регрессии; алгоритмы решения задачи оптимизации основанные на LMA (Levenberg-Marquardt algorithm).

Алгоритмическая модель реализована в виде программно-инструментальной системы PLAST-ОПТ (цифровая модель).

На основе разработанной методики предложен новый подход к проектированию узла прессования гранулятора оптимальной конструкции, учитывающий реологические свойства сырья.

Разработана методика определения реологических свойств исследуемых дисперсных материалов. Проведен комплекс стендовых натурных испытаний образцов прессованной биомассы и определены модули упругости и коэффициент Пуассона для твердой фазы исследуемых образцов, изготовленных из лузги подсолнечника и гречихи, стружки сосны и дуба, соломы и отрубей.

Проведены исследования по нахождению закономерностей влияния температуры на процесс прессования дисперсных масс. Согласно результатам проведенных опытов, определено, что для проведения процесса гранулирования исследуемых дисперсных материалов, рациональной является температура 130 - 160 °С.

Получены значения коэффициентов трения по контактными поверхностям с разной шероховатостью для образцов, изготовленных из лузги подсолнечника и гречихи, стружки сосны и дуба, соломы и отрубей.

Проведено численное моделирование процесса гранулирования разных конструктивных вариантов узлов прессования оборудования для гранулирования дисперсных материалов. Анализ результатов вычислительных экспериментов позволил исследовать влияние технологических факторов и конструктивных параметров узла прессования гранулятора на закономерности процесса прессования экструзией. С использованием разработанной методики сформулирована задача оптимизации, определены целевые функции и управляющие параметры с учетом соответствующих ограничений. Предложено решение сформулированной многоцелевой задачи оптимизации двумя способами: упрощения до одноцелевой и решение задачи поиска компромисса. Определены оптимальные конструктивные параметры узла прессования гранулятора. На основе проведенных исследований разработаны и внедрены в производство грануляционной техники рекомендации по конструированию узла прессования гранулятора оптимальной конструкции, которая дает возможность учитывать тип гранулируемого сырья.

Путем физического моделирования доказана адекватность проведенных теоретических исследований. Согласно проведенных расчетов, погрешность не превышает 29%.

Ключевые слова: грануляция, узел прессования, дисперсные материалы, математическая модель, реологические свойства.