

Центральноукраїнський національний технічний університет

Клименко В. В., Кравченко В. І., Боков В. М., Гуцул В. І.

**ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ
ВИГОТОВЛЕННЯ БІОПАЛИВА З
РОСЛИННИХ ВІДХОДІВ
ТА ЇХ КОМПОЗИТІВ**

Монографія

Кропивницький – 2017

ББК 34553
УДК 621.98.04
Б78

Рецензенти: **Мазур В.О.** – доктор технічних наук, професор, зав. кафедрою термодинаміки і відновлювальної енергетики Одеської національної академії харчових технологій;
Носуленко В. І. – доктор технічних наук, професор, зав. кафедрою обробки металів тиском та спецтехнологій Центрально-українського технічного університету

Затверджено вченою радою Кіровоградського національного технічного університету. Протокол № 3 від 28 листопада 2016 року.

Б78 Клименко В. В., Кравченко В. І., Боков В. М., Гуцул В. І.
Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та їх композитів: Монографія. /За ред. В.В. Клименка – Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. – 162 с.

У монографії узагальнені результати розробки та систематизації технологічних основ виготовлення твердого біопалива з рослинних відходів та композитів на їх основі. Наведено методику оцінки пружних коефіцієнтів двохкомпонентного композитного біопалива на основі рослинних відходів. Визначено вплив конструктивних параметрів фільтри матриці на якісні показники виготовленого біопалива та енергетичні характеристики пресового обладнання. Запропоновано та експериментально досліджено технологічні рішення виготовлення пелет поліпшеної якості з опалого листя, композитного палива на основі рослинних відходів і бурого вугілля, рослинних відходів і побутових відходів ПЕТФ.

Для фахівців паливоенергетичного профілю: інженерно-технічних робітників, науковців, аспірантів та студентів.

ISBN 978-617-7079-53-7

© Клименко В. В., Кравченко В. І., Боков В. М., Гуцул В. І.
© ПП «Ексклюзив-Систем», 2017

ЗМІСТ

ВСТУП	5
Розділ 1 СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА З ВІДХОДІВ РОСЛИННОГО ПОХОД- ЖЕННЯ	7
1.1. Енергетичний потенціал рослинних відходів в Україні	7
1.2. Основні види та характеристики твердого біопалива з рослинних відходів.....	13
1.3. Аналіз сучасного стану обладнання та технологічних процесів для виготовлення палива з твердих рослинних відходів	23
Розділ 2 ЧИННИКИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ВИГОТОВЛЕННЯ ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА	41
2.1. Вплив фізико-механічних властивостей твердих рослинних відходів та технологічних параметрів на якість виготовлення біопалива	41
2.2. Вплив конструктивних параметрів пресового облад- нання на процес виготовлення твердого біопалива	57
Розділ 3 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ РОСЛИННИХ ВІДХОДІВ	69
3.1. Особливості процесу пелетоутворення у відкриту та закриту матриці	69
3.2. Математична модель процесу пелетоутворення з використанням матриць	73
3.3. Теоретичні основи моделювання процесу пелетоутворення в закрити матрицю	90
Розділ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ БІОПАЛИВА З РОСЛИННИХ ВІДХОДІВ ТА КОМПЗИТІВ НА ЇХ ОСНОВІ	99
4.1. Експериментальні дослідження процесу виготов- лення пелет з рослинних відходів у відкриту матрицю	100
4.2. Експериментальні дослідження процесу виготов- лення біопалива з композитів на основі рослинних відходів в закрити матрицю	118
ВИСНОВКИ	130
ЛІТЕРАТУРА	133
ДОДАТКИ	146

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

ВДЕ	–	відновлювані джерела енергії;
ВКЕ	–	валове кінцеве енергоспоживання;
у.п./рік	–	умовного палива в рік;
ПЕТФ	–	поліетилентерефталат (Polyethylene Terephthalate)
E	–	модуль Юнга, МПа;
ν_1, ν_2	–	коефіцієнти Пуассона;
P	–	сила стиснення, Н;
F	–	площа поперечного перерізу зразка, мм ² ;
ε'	–	деформація в поперечному напрямку;
ε	–	деформація в поздовжньому напрямку;
γ	–	об'ємна концентрація;
V	–	об'єм гранули, м ³ ;
μ	–	модуль зсуву;
K	–	модуль стиснення;
μ_f	–	модуль Фогта;
K_f	–	модуль Рейсса;
ρ	–	густина, кг/м ³ ;
t	–	температура пресування, °С;
l_g	–	довжина формуючої конусної частини фільтри, мм;
l_k	–	довжина калібрувальної циліндричної частини фільтри, мм;
l_n	–	довжина вихідної частини фільтри, мм;
d	–	діаметр фільтри, мм;
f	–	коефіцієнт тертя;
Ra	–	шорсткість обробки поверхні отвору формуючої головки, мкм;
v	–	швидкість руху сировини, м/с;
РОД	–	розмірна обробка дугою;
M	–	продуктивність РОД, мм ³ /хв;
M_a	–	питома продуктивність РОД, мм ³ /А·хв;
a	–	питома витрата електроенергії, кВт·год/кг;
δ	–	бічний зовнішній МЕЗ, мм;
γ	–	відносний лінійний знос ЕІ γ , %;
Ra	–	шорсткість обробленої поверхні, мкм;
ЕІ	–	електрод-інструмент;
МЕЗ	–	межелектродний зазор;
$\rho_{мок}$	–	густина мокрих пелет, кг/м ³ ;
$\rho_{сух}$	–	густина сухих пелет, кг/м ³ ;

ВСТУП

Сьогодні Україна залишається енергодефіцитною державою, яка покриває свої потреби в енергоспоживанні приблизно на 53 %, імпортуючи при цьому 75 % необхідного обсягу природного газу та 85% сирової нафти та нафтопродуктів [1].

Дефіцит первинних джерел енергії повинен активно покриватися ВДЕ. Так, у ЄС було прийнято директиву щодо активізації розвитку відновлювальної енергетики, відповідно до якої країни Євросоюзу до 2020 року зобов'язані збільшити частку відновлювальних джерел енергії при видобутку тепла та електроенергії до 20 % [2]. Національним планом дій з відновлюваної енергетики до 2020 року встановлено загальну мету, згідно якої внесок ВДЕ до валового кінцевого енергоспоживання має досягти 11 % у відповідності до зобов'язань України як члена Енергетичного співтовариства [3].

Біомаса є ваговою складовою ВДЕ і має великий потенціал, доступний для енергетичного використання – більше 27 млн. тон у. п./ рік за оцінками 2013 року. Шляхом залучення цього потенціалу до виробництва енергії в найближчій перспективі можна задовольнити 13-15% потреби держави в первинній енергії [4].

За обсягами енергетичного споживання біомаси Україна суттєво відстає від багатьох розвинених країн світу. Так, в Європейському Союзі частка ВДЕ у валовому кінцевому енергоспоживанні складає 15 % (2013 рік), в тому числі біомаса – близько 9% валового кінцевого енергоспоживання (ВКЕ) або 62 % загального внеску всіх ВДЕ [3]. Згідно енергетичного балансу України за 2013 рік, частка відновлюваних джерел у валовому кінцевому енергоспоживанні становила 3,62 %, в тому числі біомаса – 2,28 %, що складає всього 3% від усіх ВДЕ.

Однією з причин низького значення відсотку залученої біомаси в енергоспоживанні країни є висока частка централізованого опалення у

теплопостачанні. Однак внаслідок зношення обладнання тепло-генеруючих підприємств, великих тепловтрат в системах транспорту теплоносіїв, що знаходяться в незадовільному, а часто і в аварійному стані, зводять нанівець розрахункові переваги централізованого теплопостачання. Окрім того така ситуація суттєво зменшує енергетичну безпеку і стійкість населених пунктів до впливу техногенного, кліматичного і військового характеру.

Отже дослідження та розробки, направлені на розширення бази застосування біомаси в автономних енергетичних установках, удосконалення технологій виготовлення біопалива, зокрема з твердих рослинних відходів та композитів на їх основі, є актуальними для вирішення завдань заміщення природного газу альтернативними видами палива і важливими для забезпечення енергетичної безпеки України.

Розділ 1

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА З ВІДХОДІВ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ

1.1. Енергетичний потенціал рослинних відходів в Україні

Згідно визначення, наведеного в директиві Європарламенту та Ради Європи 2009/28/ЕС, біомасою є речовина органічного походження, що зазнає біологічного розкладу – продукти, відходи та залишки сільського господарства, лісового господарства та пов'язаних з ними галузей, а також частина промислових та побутових відходів, що зазнає біологічного розкладу.

В законодавстві України визначення біомаси, як сировини, для енергетичного використання міститься в Законі України «Про альтернативні види палива»: біомаса – біологічно відновлювальна речовина органічного походження, що зазнає біологічного розкладу (відходи сільського господарства (рослинництва і тваринництва), лісового господарства та технологічно пов'язаних з ним галузей промисловості, а також органічна частина промислових та побутових відходів. На такому визначенні біомаси базується визначення поняття біологічних видів палива (біопалива): тверде, рідке та газове паливо, виготовлене з біологічно відновлювальної сировини (біомаси), яке може використовуватися як паливо або компонент інших видів палива.

Походження біомаси може бути досить різноманітним, починаючи з відходів та залишків сільського господарства, харчової промисловості, домашнього господарства і закінчуючи відходами комунального господарства. Джерелом біомаси є також відходи деревини в лісовому господарстві, деревообробній та целюлозно-паперовій промисловості. Для виробництва біомаси використовуються також спеціальні енергетичні культури, що дають швидкий приріст маси (верба, тополя, платан), або

певних сортів трав'янистих рослин (міскантус, просо, сорго та інші). До енергетичних культур також можна віднести ріпак, соняшник для виробництва рідких моторних палив. З метою енергетичного використання може вирощуватися і кукурудза та сорго, як для виробництва твердого біопалива так і біогазу.

Біомасу (рис. 1.1) можна використовувати в енергетичних цілях шляхом безпосереднього спалювання, а також у переробленому вигляді рідких (ефіри ріпакової олії, спирти, рідкі продукти піролізу) або газоподібних біопалив (біогаз з відходів сільського господарства та рослинництва, осаду стічних вод, твердих побутових відходів, продукти газифікації твердих палив).

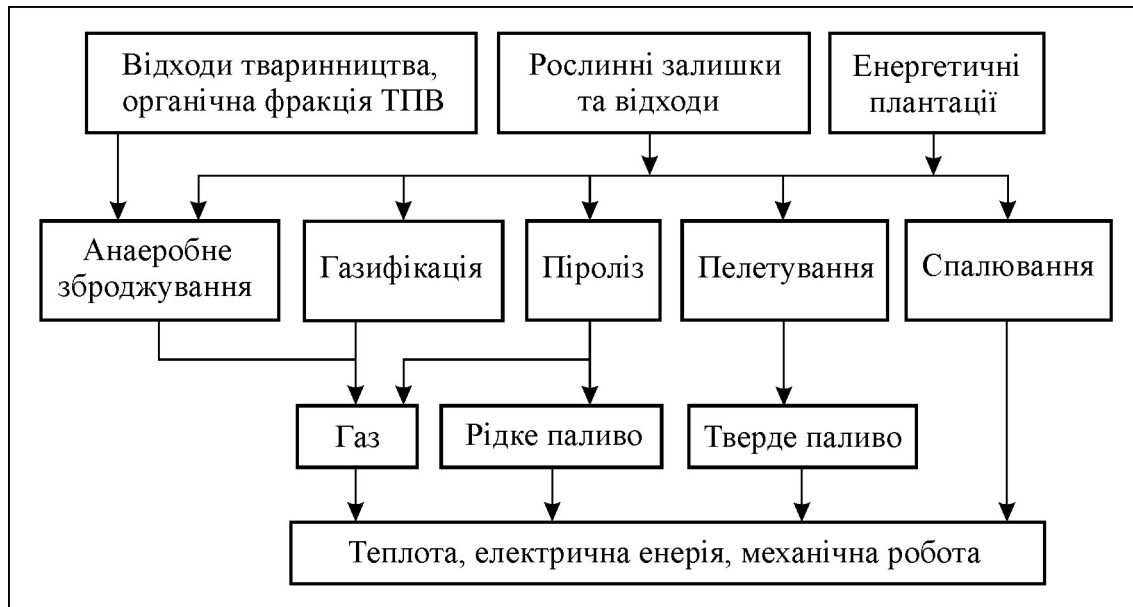


Рисунок 1.1 – Способи виробництва енергії з біомаси

Конверсія біомаси в інші види енергоносіїв або кінцеву енергію (теплову або електричну) може відбуватись фізичними, хімічними і біохімічними методами. Головні переваги біомаси:

- біомаса є місцевим видом палива. В процесі виробництва енергії з біомаси використовуються наявні місцеві ресурси регіону, включаючи і трудові. Таким чином, використання біомаси приводить: до розвитку місцевої економіки; відновлюваності, нейтральності по відношенню до емісії парникових газів; відносної простоти добування і використання;

- біомаса є відновлюваним видом палива, а отже при раціональному використанні, є, по суті, невичерпним джерелом енергії, використання якого сприяє сталому розвитку регіону, та не створює типові для традиційних енергоносіїв ризики поступового витрачання (відповідного підвищення цін) через виснаження природних родовищ;

- біомаса є екологічно чистим паливом у порівнянні із іншими твердими видами палива, наприклад, вугіллям. Як правило, біомаса містить мало сірки, а її спалювання при відносно невисоких температурах не приводить до утворення окислів азоту. Крім того, завдяки включенню біомаси у природний цикл поглинання, зберігання та вивільнення CO₂, спалювання біомаси не призводить до посилення парникового ефекту та знижує негативний антропогенний вплив на оточуюче середовище;

- біомаса, як правило, є більш дешевим паливом у перерахунку на одиницю енергії, ніж інші види традиційних енергоресурсів; при цьому тенденції останніх двадцяти років показують більш швидкі темпи росту цін на традиційні енергоресурси, ніж на відновлювані, і ця різниця з кожним роком збільшується;

- використання біомаси зменшує кількість відходів та сміття у містах, а у випадку використання біогазу приводить до утилізації небезпечних відходів з полігонів твердих побутових відходів, що сприяє очищенню засмічених територій, поверненню біорізноманіття, загальному покращенню екології;

- впровадження об'єктів генерації на біомасі сприяє залученню сучасних, передових технічних рішень у сферу теплозабезпечення, оновленню технологічних парків існуючого обладнання, розвитку виробництва нового обладнання, діяльності з його монтажу та обслуговування.

Основними складовими потенціалу біомаси в Україні є первинні агровідходи (солома, відходи виробництва кукурудзи на зерно і соняшника), які залишаються на полях як побічні продукти після збору

врожаю первинних сільськогосподарських культур та енергетичні культури, вирощування яких у промислових масштабах активно розвивається в країні останніми роками. Найважливішим видом первинних відходів сільського господарства, доступним для енергетичного використання, є солома. Її отримують після збору врожаю в основному злакових або інших однорічних лігноцелюлозних культур. Щорічно в Україні виробляється близько 25 млн. тон соломи, з яких мінімум 20 % може бути використано як біопаливо [5]. За своїм складом солома відрізняється від деревинних відходів і тирси значним вмістом летких речовин, низькою густиною і більшим часом горіння.

Вторинні відходи сільського господарства виробляються та нагромаджуються при обробці сільськогосподарських культур для виробництва харчових продуктів та корму. До них відносять: лушпиння соняшнику, рису, горіхова шкаралупа, відходи квасолевих бобів та інші види біомаси подібного типу. Загалом економічний потенціал відходів сільського господарства складає 12,2 млн. тон у.п./рік, енергетичних культур – 10 млн. тон у.п./рік. Складові потенціалу біомаси в Україні наведені в таблиці 1.1 [3].

Таблиця 1.1 – Енергетичний потенціал біомаси в Україні (2013 р.)

Вид біомаси	Теоретичний потенціал, млн. т	Економічний потенціал, млн. т у.п.
Солома зернових культур	30,6	4,54
Солома ріпаку	4,2	0,84
Відходи виробництва кукурудзи	40,2	4,39
Відходи виробництва соняшника	20,9	1,72
Вторинні відходи с/г	6,8	0,69
Деревна біомаса	4,6	1,97
Енергетичні культури: верба, тополя, міскантус	11,5	6,28

Таблиця 1.2 – Використання біомаси для виробництва енергії

Вид біомаси/біопалива	Річний обсяг споживання		Частка в річному обсязі споживання, %	Частка використання економічного потенціалу, %
	Натуральні одиниці	тис. тон у.п.		
Солома зернових культур та ріпаку	94 тис. т	48	1,8	0,9
Дрова (населення)	5,0 млн. м ³	1200	45,1	>90
Деревна біомаса (крім споживання населенням)	3,2 млн. т	1089	40,9	
Лушпиння соняшника	380 тис. т	208	7,8	41

Наразі на енергетичні потреби в Україні використовується лише близько 10 % загального потенціалу біомаси – 2,7 млн. тон у.п./рік (табл. 1.2) [3]. Головним чином це деревна біомаса у вигляді дров, тріски, гранул/брикетів (загалом 86 % всього річного обсягу використання біомаси), та лушпиння соняшника (8 %). Найменш активно застосовуються рослинні відходи – 94 тис. тон соломи на рік, що становить < 1 % економічного потенціалу соломи в Україні.

На рисунках 1.2 і 1.3 представлений енергетичний потенціал біомаси для 2013 року. Очевидно, що найбільший потенціал деревної біомаси доступний у найбільш лісистих північних та північно-західних районах України – Житомирська, Львівська, Рівненська, Київська області, а також гористі ділянки Карпат і Криму. Загальний потенціал деревної біомаси у 2013 р. складав 1378 тис. т у нафтовому еквіваленті (н.е.), агробіомаси – 8039 тис. т н.е. Потенціал деревної біомаси залежить від рівня розвитку деревообробної промисловості в регіоні, а також від рівня рубок деревини, що наразі становить приблизно 50 % від щорічного приросту.

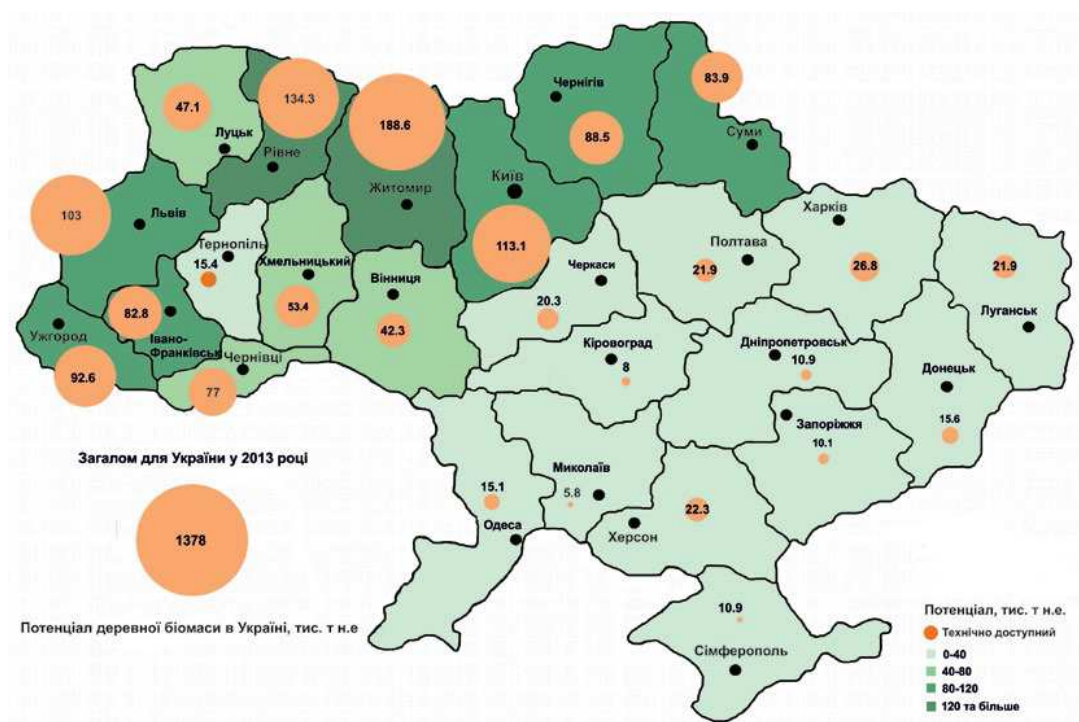


Рисунок 1.2 – Потенціал деревної біомаси в Україні у 2013 році

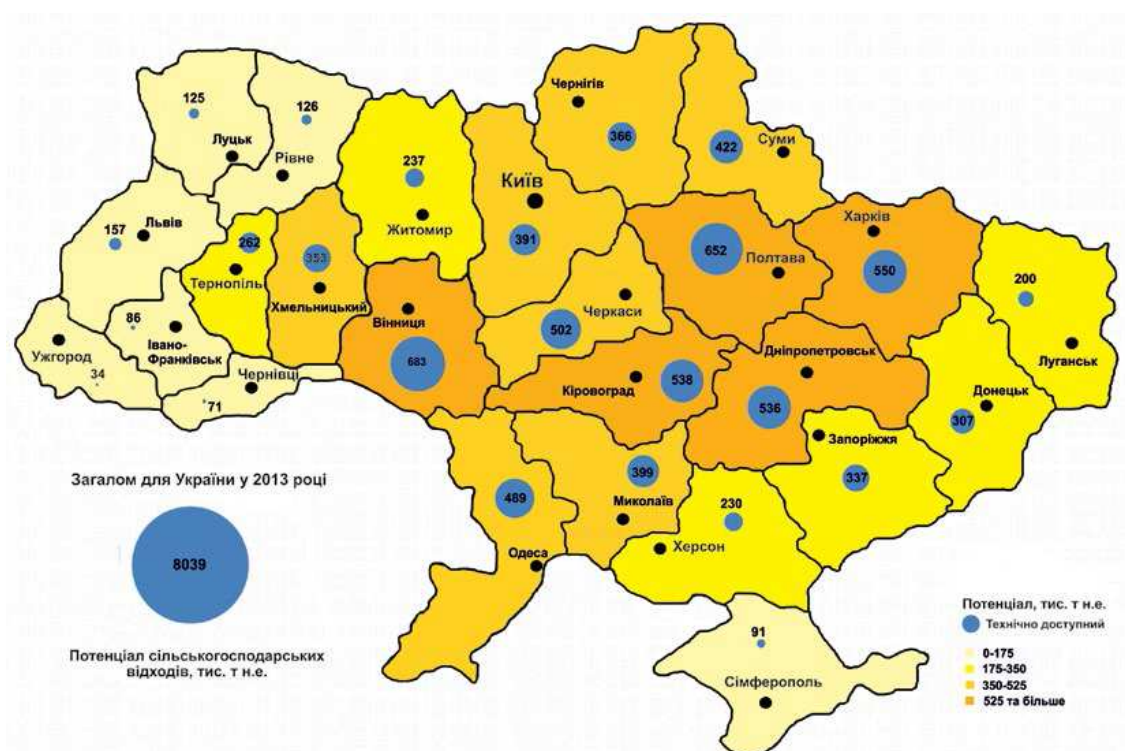


Рисунок 1.3 – Потенціал агробіомаси в Україні у 2013 році

У центральних, південних та південно-східних районах України, де розвинуте сільське господарство і харчовий переробний сектор, найбільш доступний наявний потенціал агробіомаси цих галузей.

Для агробіомаси основним фактором, що впливає на потенціал, є щорічна урожайність агрокультур, що суттєво коливається в залежності від кліматичних умов кожного року. Крім того, вбачаючи тенденцію росту урожайності в Україні в найближчі роки, потенціал агробіомаси також зростатиме.

1.2. Основні види та характеристики твердого біопалива з рослинних відходів

Найбільш широко застосовують тверде біопаливо, виготовлене з твердих рослинних відходів у вигляді пелет та брикетів [3, 5].

Пелети – це спресовані частинки рослинного походження, що мають форму циліндрів максимального діаметра до 25 мм і завдовжки від 10 до 50 мм. Вони можуть бути виготовлені з деревини, торфу, трави, лушпиння, соломи, вугільного пилу та багатьох інших видів рослинної сировини, а також їх сумішей (рис. 1.4) [6]. Циліндрична форма паливних гранул забезпечує їм сипкість і дозволяє застосовувати автоматизацію у подавальних пристроях енергетичних установок.



а) – лушпиння гречки; б) – солома зернових культур; в – деревна стружка; г - торф; д – лушпиння соняшника; ж – лушпиння рису

Рисунок 1.4 – Зразки пелет із різної сировини

Паливні брикети – це спресовані вироби циліндричної, прямокутної, шестигранної або будь-якої іншої форми, довжиною 100-300 мм (рис. 1.5) [6]. При виготовленні брикетів циліндричної форми, їх довжина не повинна перевищувати діаметр у п'ять разів, який більший ніж 25 мм, та зазвичай становить $60 \div 75$ мм. Стандартних розмірів у даній продукції немає.



Рисунок 1.5 – Форми брикетів з рослинних відходів

Паливні пелети і брикети мають високу конкурентоспроможність порівняно з іншими видами традиційного палива. Так, для їх виробництва витрачається близько 3 % енергії, при цьому під час виробництва нафти ці енерговитрати становлять близько 10 %, а при виробництві електроенергії – 60 %. Їх теплотворна здатність в 1,5 рази більше, ніж у звичайної деревини і вугілля. При спалюванні 2000 кг пелет виділяється стільки ж теплової енергії, як і при спалюванні: 3200 кг деревини, 957 м³ газу, 1000 л дизельного палива, 1370 л мазуту. Горіння такого палива в топці котла відбувається більш ефективно – кількість золи не перевищує 0,5...1,0 % від загального об'єму використаного палива. Крім того, ціни на таке паливо не залежать від зростання цін на викопні види палива і на підвищення екологічних податків. Порівняльну характеристику різних видів твердого біопалива наведено в таблиці 1.3 [12].

Таблиця 1.3 – Порівняльна характеристика різних видів твердого біопалива

Вид палива	Вологість матеріалу, %	Теплотворна здатність, МДж/кг	Вміст сірки, %	Вміст золи, %
Гілки плодівих дерев	20	10,5	—	—
Виноградна лоза	20	14,2	—	—
Тріски дерев, тирса	40-45	10,5-12,0	0	2
Брикети з деревини	7-8	16,8-21,0	—	—
Пелети з деревини	9-10	17,5-19,5	0,1	1
Солома	20	10,5-12,5	—	—
Солома в тюках	14-17	14,2	—	—
Пелети з соломи	8-10	16,5-18,8	0,2	4
Брикети з соломи	6-10	15,4-21,0	—	—
Брикети з полови	—	16,7	—	—
Стебла соняшнику	20	12,5	—	—
Брикети з лушпиння соняшнику	6-8	21,0-21,8	—	—
Пелети з лушпиння соняшнику	6-8	18,5-20,0	—	—
Стебла кукурудзи	20	12,5	—	—
Брикети з качанів	—	18,0	—	—

Слід відмітити, що останнім часом у виробництві твердого біопалива пропонується використовувати біомасу у вигляді опалого листя дерев. Навіть невелика частка такого безкоштовного джерела може бути значним внеском у справу скорочення спалювання природних копалин.

Листя, що залишається для цілей перегнивання або які зібрані і вивезені на звалища, в процесі розкладання викидають в атмосферу метан, який у більше ніж двадцять разів сильніший парниковий газ, ніж вуглекислий. Ефективне вирішення проблеми утилізації опалого листя може дати подвійний позитивний ефект для екології, оскільки при горінні

листя в атмосферу виділяється вуглекислий газ, що був відібраний деревом з повітря на протязі сезону.

Peter Morrison та Sharon Warmington з Бірмінгему та їх компанія BioFuels International перетворюють опале листя у поліна Leaf Log (рис. 1.6). Технологія виробництва такого палива включає крім сушки і ущільнення біомаси – додавання воску (30% по масі), який є додатковою горючою речовиною. Незалежні випробування показали, що поліна Leaf Log, виготовлені з опалого листя, дають 27,84 МДж/кг теплової енергії, що порівняно по теплоті згоряння з високоякісним вугіллям і більше, ніж у деревини [7].



Рисунок 1.6 – Поліна Leaf Log з опалого листя

Підвищити ефективність використання різних видів твердих рослинних відходів для виробництва біопалива можна шляхом попереднього їх змішування та приготування композитів, що включають інші види вуглецевмісних матеріалів [наприклад, побутові відходи поліетилентерефталату (ПЕТФ)], місцеві види палива. При цьому можна очікувати досягнення синергетичного ефекту внаслідок більш ефективного

використання ресурсу біомаси та часткового зменшення негативного впливу на довкілля внаслідок утилізації відходів.

Так, відоме сумісне переробка вугілля і біомаси, що охоплює такі види термохімічної переробки твердого палива: пряме сумісне спалювання вугілля і біомаси та газифікація біомаси з подальшим спалюванням генераторного газу у вугільних котлах [8].

Сумісне спалювання біомаси та вугілля має відповідні переваги перед їх роздільним спалюванням. Головними з них є:

- використання біомаси замість основного палива практично не потребує переобладнання. Однак специфічні властивості біомаси в особливості їх шлаки і корозійні властивості змушують обмежити частку їх використання в суміші з вугіллям в одній установці. Більшістю зарубіжних дослідників встановлено розмір цієї частки не більше 10-20 %, а найбільш впевнено – 5-10 % (конкретна частка визначається в залежності від характеристик біомаси, яка використовується, та від топкового пристрою), ці данні збігаються з вітчизняними дослідженнями;

- стабілізація процесу спалювання проходить за рахунок спалювання вугілля;

- зменшення емісії SO_2 , NO_x , CO_2 , порівняно з викопними паливами;

- паливна еластичність котла і відсутність залежності виробництва електроенергії від доступності біомаси (логістичні проблеми), що вигідно для оператора енергетичної системи.

Використовуючи в таких технологіях гранульоване і брикетоване біопаливо, можна уникнути негативних сторін сумісного спалювання, які виникають при застосуванні їх у вигляді сипкої сировини, а саме:

- невідповідна швидкість подачі біомаси і палива до камери спалювання;

- неоднорідний характер горіння у камері спалювання котла;

- нерівномірність теплових навантажень поверхонь опалювального котла;

- велика різниця у фізико-хімічних властивостях біомаси і вугілля (густина, вологість), що визначають вибір технологічних рішень по забезпеченню сушки біомаси, її розмелу і транспортування тощо.

Одним з раціональних способів підвищення ефективності одержання теплової енергії з твердого палива є його газифікація. Змінюючи склад композитів рослинних відходів або їх фракційність у пелетах або брикетах, можна виробляти синтез-газ у газогенераторах із покращеними характеристиками. Так, наприклад, використання пелет, виготовлених з суміші гранульованого вугілля і тирси з різною фракційністю, в процесі газифікації дозволяє збільшити вихід метану CH_4 та окису вуглецю CO , що збільшить теплоту згорання виробленого синтез-газу [9,10].

Значною проблемою в Україні, як і в світі, є утилізація твердих побутових відходів, зокрема з полімерних матеріалів. У випадках, коли побутові відходи, наприклад поліетилентерефталату (ПЕТФ), не можуть бути повторно використані, можливе їх енергетичне застосування шляхом спалювання з утилізацією тепла, що утворюється при цьому.

Але застосування вищезгаданого процесу газифікації є більш високотехнологічним для утилізації таких матеріалів. Тому шляхом створення композитного палива на основі рослинних відходів можна вирішити подвійну задачу по заощадженню первинних джерел енергії та утилізації шкідливих побутових відходів.

Основні характеристики біопалива. Аналіз літературних джерел та критерії оцінки біопаливної продукції показують, що найбільш важливими її характеристиками є: розміри (діаметр та середня довжина), теплотворна здатність, вміст вологи, зольність, питома та насипна густина, вміст хімічних елементів (хлор, азот, сірка тощо) та домішок.

Для пелет прийняті жорсткіші вимоги до габаритних розмірів, ніж до брикетів. Це обумовлено їх застосуванням в енергетичних установках з

автоматичною системою подачі (шнеками, транспор-терами тощо). Найбільш поширеними є діаметри пелет 6 і 8 мм.

Обумовлена більшістю стандартів теплота згоряння пелет становить 18 ± 1 МДж/кг [12], залежно від сировини, з якої вони виготовлені.

Зольністю називають вміст мінеральних речовин у паливі, що залишаються після повного згоряння всієї горючої маси. Вміст золи у біопаливі, відповідно до стандарту європейських країн, становить менше 1,5%. Зола є небажаною часткою палива, оскільки знижує вміст горючих елементів і ускладнює експлуатацію топкових пристроїв, але при спалюванні в промислових установках з автоматичним золовидаленням, зольність пелет не має великого значення.

Вологість біопалива впливає не тільки на його якість, але і на теплотворну здатність. Низькій вміст вологи забезпечує якісне горіння пелет.

Питома густина якісних паливних гранул становить $1,0 \div 1,3$ кг/дм³, яка змінюється залежно від виду сировини та обладнання, на якому вони виготовляються. Густина є основним чинником, що характеризує механічну міцність, водостійкість та теплотворну здатність пелет. Чим щільніші пелети, тим вище показники їх якості. Так, при густині гранул $0,65 \div 0,75$ кг/дм³ калорійність їх становить $12 \div 14$ МДж/кг, а при густини $1,2 \div 1,3$ кг/дм³ – $25 \div 31$ МДж/кг [12].

Насипна густина, що є співвідношенням між вагою матеріалу і кількістю займаного простору, при гранулюванні біомаси збільшується зі 100 до 650 кг/м³.

Низький вміст хлору, азоту і сірки свідчить про виготовлення пелет з екологічно чистої біосировини. Підвищений вміст цих елементів в продуктах згоряння може призвести до корозії паливного обладнання.

Домішки у біопаливі використовуються як сполучні елементи. При застосуванні якісної сировини з оптимальним вмістом вологи і без

порушення технології виготовлення, при пресуванні не додається жодних домішок.

Стандарти біопалива. Для одержання максимальної економічної ефективності при використанні рослинної біомаси на енергетичні цілі, необхідно забезпечити підвищення питомої теплоти згоряння твердого палива, зручність транспортування до енергетичних установок та керованість процесом горіння. Для цього необхідно дотримуватись вимог технології виготовлення продукції, використовувати якісну сировину, яка має відповідати встановленим вимогам, тобто створювати якісне стандартизоване паливо.

До теперішнього часу ще не встановлено українського стандарту на біопаливні пелети, окрім проекту ДСТУ «Брикети та гранули паливні. Технічні умови. Частина 1. Брикети та гранули паливні з деревинної сировини» розробленого в Національному університеті біоресурсів і природокористування України. Тому більшість виробників орієнтується на західноєвропейські стандарти. В європейських країнах у 90-х роках відбулася перша хвиля стандартизації для підприємств-виробників паливних гранул [13]. В результаті цього процесу було розроблено та прийнято наступні стандарти: Австрія - O-Norm 7135 Austrian Association pellets (briquettes and pellets); Англія – The British BioGen Code of Practice for biofuel (pellets); Німеччина – DIN 51731 (briquettes and pellets); США – Standard Regulations & Standards for Pellets in the US: The PFI (pellet); Швейцарія – SN 166000 (briquettes and pellets); Швеція – SS 187120 (pellets) [13].

Стрімкий розвиток виробництва та споживання паливних гранул, а також зростання кількості суміжних представників цього ринку, стали передумовою для введення в ЄС нових норм щодо якості паливних гранул. Вимоги за новим стандартом EN 14961-2, введеного в дію 1 січня 2011 р., які підтверджуються міжнародним сертифікатом EN plus, були не тільки

посилено, а й доповнено новими критеріями [14]. Всі національні стандарти DIN Plus, DIN 51731, O-Norm 7135, SS 1871 та інші втратили свою силу. За новими стандартами пелети розподіляються за якісними характеристиками на три класи:

- EN Plus-A1 – це пелети найвищої якості із зольністю до 0,5% і діаметром до 8мм. Фактично цей стандарт замінив собою стандарт на пелети DIN plus.
- EN Plus-A2 – це пелети із зольністю до 1,5% або це стандарт на промислові пелети.
- EN-B – це пелети із зольністю до 3%. В нашій країні з такими характеристиками зустрічаються пелети із сільськогосподарських відходів.

Найбільш жорсткі вимоги встановлені для паливних гранул першого сорту A1. Максимально допустима зольність для таких гранул становить 0,5 % (пелети з хвойних порід дерева) і 0,7 % (із листяних порід). Такі гранули рекомендовано до використання у приватному секторі. Другий сорт паливних гранул A2 може бути вироблений із змішаних сортів дерев і мати зольність до 1 %. Пелети такого стандарту зазвичай використовуються у котельних широкого профілю. Так звані промислові гранули за новими нормами віднесені до третього сорту Вони призначені для використання на потужних теплових станціях промислового типу.

Порівняльний аналіз нових європейських стандартів паливних гранул EN plus із колишнім німецьким стандартом DIN plus наведено у таблиці 1.4 [12].

Порівняння табличних показників показує зміну у нормі теплоти згорання. Зменшення мінімального значення у нових стандартах до 16,5 МДж/кг вказує на можливість використання гранул із сировини, яка раніше не мала цінності для енергетичного ринку. У нових стандартах обов'язковою характеристикою стає насипна маса паливних гранул та додається норма щодо температури плавлення золи.

Примітка: "не має" - означає: відомості відсутні, значення не визначене або відсутня їх величина та ін., тверде біопаливо повинно відповідати вищевказаним вимогам.

1.3. Аналіз сучасного стану обладнання та технологічних процесів для виготовлення палива з твердих рослинних відходів

Весь процес виробництва умовно можна розділити на кілька етапів: подрібнення, сушіння, кондиціонування, пресування, охолодження, розфасовка і упаковка. Технологічна послідовність виготовлення пелет з рослинних відходів показана на рисунку 1.7.

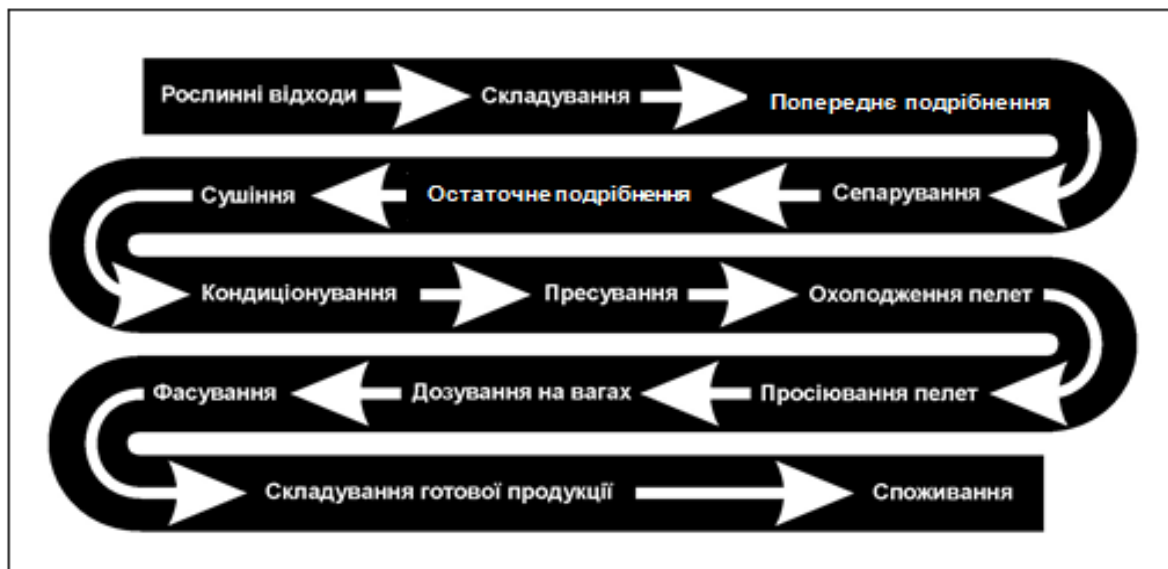


Рисунок 1.7 – Технологічна послідовність виготовлення пелет з рослинних відходів

На початку виготовлення біопалива зібрані рослинні відходи подаються на попереднє подрібнення. Після подрібнення сировина проходить сепарування з вилучення з неї каміння, коріння та інших домішок, а матеріал надходить на остаточне подрібнення. Після подрібнення біосировина підлягає сушінню, а потім кондиціонуванню для одержання необхідної вологості перед пелетуванням. Виготовлені пелети проходять спочатку охолодження, а потім просіювання перед дозуванням на вагах. Заключний процес в технології виготовлення біопалива перед складуванням готової продукції і відправлення її споживачеві є фасування.

Залежно від стану вхідної сировини, її технологічних параметрів та фізико-механічних характеристик, кількість технологічних операцій та

послідовність їх виконання може бути змінена у будь-якому окремо взятому випадку. Так, наприклад, при застосуванні сировини з вологістю до 12 % (лушпиння соняшника або суха стружка), етап сушіння відсутній.

Схемне рішення виробництва біопалива з твердих рослинних відходів зображено на рисунку 1.8 [15].

Повний технологічний процес комплексу по виготовленню біопалива, наведені на рисунку 1.8 полягає у наступному. Дрібнофракційна сировина підвозиться автотранспортом і зсипається на механізований рухомий склад 1, звідки сировина з регульованою швидкістю подачі спрямовується до ланцюгового (скребкового) транспортеру 2 і потім на дисковий сепаратор 3.



1 - рухомий склад; 2, 9, 22, 23 - транспортери; 3 - сепаратор; 4 – сушильно-подрібнювальний агрегат; 5 - теплогенератор; 6 – труба атмосферного повітря; 7 – бункер палива; 8, 16 - циклони; 10 - бункер пелетоутворювача; 11 - пелетоутворювач; 12, 15 – норії; 13 - охолоджувач; 14 - сортувальник; 17 - бункер готової продукції; 18 - ваги; 19 - димова труба; 20 - пульт управління; 21 - подрібнювальна машина; 24 – система пневмотранспорту

Рисунок 1.8 – Схемне рішення виробництва біопалива з твердих рослинних відходів

На сепараторі від сировини відділяються каміння, коріння інші домішки, які потрапляють до переносного контейнера (на схемі не показано), а сировина самопливом потрапляє до завантажувальної секції

агрегату сушки-подрібнювача 4. До агрегату 4 подаються продукти горіння з теплогенератора 5 і засмоктується холодне атмосферне повітря через трубу 6. Початково змішуються продукти горіння і холодне повітря. Пропорція змішування регулюється автоматично, що забезпечує підтримку заданої температури теплоносія. Потім теплоносій змішується з вологою сировиною і засмоктується в агрегат сушки-подрібнювача 4. В останньому сировина подрібнюється і потім висушується, піднімаючись в потоці теплоносія до динамічного класифікатора, що знаходиться у головній секції агрегату сушки-подрібнювача. Динамічний класифікатор, частота якого задається з пульта управління 20, пропускає дрібну і суху сировину, а великі і вологі частинки сировини повертає до ротора агрегата. Такий процес повторюється до одержання необхідної вологості і ступеня подрібнення сировини.

Подрібнена і висушена сировина засмоктується в осадочний циклон 8 за рахунок розрідження, що створюється димососом. В циклоні сировина осідає за рахунок відцентрової сили і рухається вниз, а відпрацьований теплоносій викидається в димову трубу 19. З циклона сировина через шлюзовий затвор подається в шнековий або ланцюговий транспортер 9, далі надходить в бункер пелетоутворювача 10. В середині бункера знаходиться пристрій, що перешкоджає злежуванню сировини.

З бункера сировина подається шнековим живильником з регульованою швидкістю подачі до змішувача (кондиціонера) преса, сюди ж подається вода або пара. У змішувачі відбувається кондиціонування продукту, тобто доведення вологості сировини до рівня, що необхідне для процесу гранулювання. Зі змішувача зволожена сировина через віддільник феромагнітних домішок виводиться в прес-пелетоутворювач 11.

В камері пресування пелетоутворювача сировина затягується між матрицею, що обертається і пресувальними роликками (вальцями) і продавлюється в радіальні отвори матриці, де під дією великого тиску відбувається формування гранул.

Виштовхнуті з отворів гранули зрізаються нерухомим ножем, зсипаються через рукав кожуху на вертикальний транспортер-норію 12, який подає їх в охолоджувальну колонку 13. В охолоджувальну колону 13 через шар пелет вентилятором циклона 16 засмоктується повітря, яке їх охолоджує і одночасно видаляє частину незгранульованої сировини в циклон 16. В процесі охолодження вологість гранул зменшується за рахунок випареної вологи, і в них відбуваються фізико-хімічні зміни. В результаті вони набувають необхідну твердість, вологість і температуру. З охолоджувальної колонки, гранули надходять на сортування 14, де відбувається відокремлення кондиційних виробів від крихти, яка направляється на повторне гранулювання.

Норією 15 гранули подаються в бункер готової продукції 17. На ньому розташовано дозатор, а під ним електронні ваги 18. Готову продукцію завантажують у великі мішки (біг-беги), або здійснюють розфасовку у 15-и кілограмові поліетиленові мішки, які укладаються на піддон. Заповнені біг-беги або піддони з мішками навантажувальником або гідравлічним візком транспортуються на склад готової продукції.

Теплогенератор 5 завантажувється паливом в автоматичному режимі з бункера палива 7. Поповнення бункера паливом відбувається автоматично за рахунок повернення частини підготовленої до пресування сировини від осадочного циклону 8 системою пневмотранспорту 24.

При надходженні на переробку довгих рослинних відходів, вони подаються у подрібнювальну машину 21 транспортером 22. З неї тріска потрапляє до транспортеру 23 і далі на механізований рухомий склад 1.

Конструкції основного обладнання для виготовлення біопалива.
Попереднє подрібнення рослинних відходів (очерету, стебел камишу, соломи, сіна, люцерни тощо) до фракції 5...10 мм здійснюється подрібнювальними та соломорізальними машинами (рис. 1.9, 1.10) [16,17].



Рисунок 1.9 – Подрібнювач рослинних відходів СУ-1500 продуктивністю 1200 кг/год



Рисунок 1.10 – Соломорізальна машина

Для остаточного подрібнення рослинних відходів (соломи, лущиння, тирси, тощо) до фракції 0,5*1,5 мм перед подачею до преса в лініях гранулювання та брикетування можуть застосовуватись наступні типи дробарок (рис. 1.11, 1.12, 1.13) [18,19,20].



Рисунок 1.11 – Дробарка молоткова ДМ-2000 для подрібнення біомаси

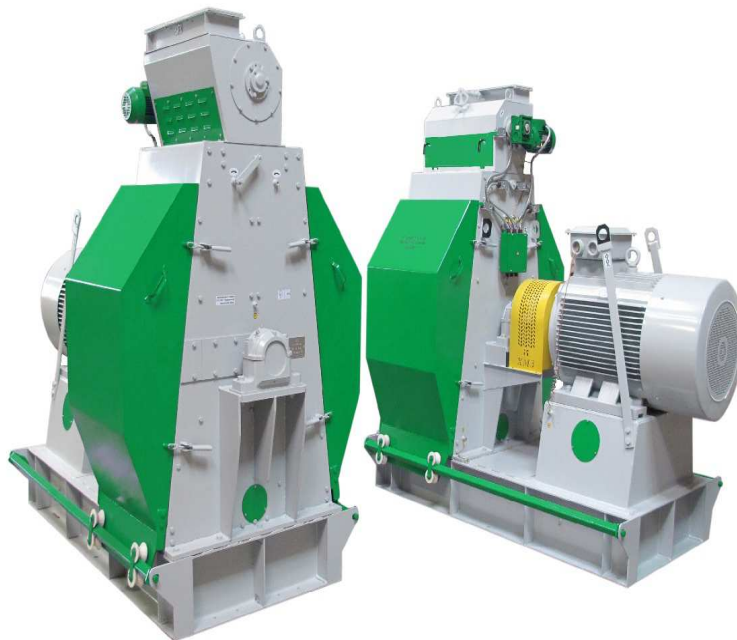


Рисунок 1.12 – Дробарка А1-ДМ2Р для подрібнення різних рослинних відходів



Рисунок 1.13 – Молоткова дробарка «ЗУБР» продуктивністю від 1 до 5 т/год.

У деяких технологіях виготовлення пелет замість подрібнення молотковою дробаркою можуть застосовуватись дезінтегратори (рис. 1.14) [21]. Дезінтегратор забезпечує подрібнення сировини до рівня 5...10 мкм з рівнем вологості до 40 %. При цьому відбувається зниження енерговитрат на сушіння біоматеріалу з перерозподілом потужностей: зниження потужності пресового обладнання в 25 разів при збільшенні ланки подрібнення (заміна молоткової дробарки на дезінтегратор) до 2 разів.



Рисунок 1.14 – Дезінтегратор з двома електродвигунами

Для доведення вологості матеріалу до нормативних значень використовують сушарки барабанного або стрічкового типу. Вибір типу сушарки визначається видом сировини, вимогами до якості продукції і джерелом одержання теплової енергії. В технологічному процесі виробництва твердого біопалива сушка є найбільш енергоємним процесом. Варіант сушарки призначеної для сушки рослинних відходів вологістю 50-75 % до необхідної вологості 10-15 % наведено на рисунку 1.15 [22].



Рисунок 1.15 – Барабанна сушильна лінія АВМ

Для сушки соломи, стебел зернових культур, стружки інших рослинних відходів, а також в лініях з виробництва паливних пелет або брикетів може використовуватись трубчаста сушарка (рис. 1.16) [23].



Рисунок 1.16 – Сушарка трубчаста

Сушильний комплекс барабанного типу продуктивністю до 1000 кг/год, призначений для сушки соломи, лушпиння соняшника, гречки, тирси, комбікорму та інших сипких матеріалів в комплектації ліній граулювання та брикетування, наведено на рисунку 1.17 [24].



Рисунок 1.17 – Сушильний комплекс барабанного типу продуктивністю до 1000 кг/год



Для додаткового зволоження сировини застосовують звичайно шнекові змішувачі, що мають можливість подачі води або пари. Пару застосовують для зниження міцності і збільшення пластичності сировини.

Рисунок 1.18 – Протитоковий охолоджувач (ІСК Group Україна)

З метою охолодження пелет можуть застосовуватись протитокові охолоджувачі (рис. 1.18) [25]. В таких установках біопаливо надходить в охолоджувач і рівномірно розподіляється за допомогою спеціального розподільника. Повітря проходить через шар продукту у протитоковому напрямку, охолоджуючи його.

Замість циклона, що використовується у технологічній лінії по виготовленню біопалива, можуть застосовуватись просіювальні машини (рис. 1.19) [26], які потрібні для відділення дрібної фракції, що виникає при частковому подрібненні окремих гранул, і доведенні кінцевого продукту до необхідних якісних показників.



а



б

Рисунок 1.19 – Просіювач фірми SALMATEC – (а), просіювач ІСК Груор, Україна – (б)

Принцип роботи просіювача полягає у розділенні початкової суміші на фракції шляхом послідовного її просіювання через кілька ярусів решіт, що здійснюють зворотно-поступальні і коливальні рухи, та виділенні легких домішок і пилу з крупної фракції шляхом проходження її через висхідний потік повітря у витяжному каналі.

Для невеликих господарств може бути прийнятний комплекс обладнання для виробництва пелет, показаний на рисунку 1.20 [27].

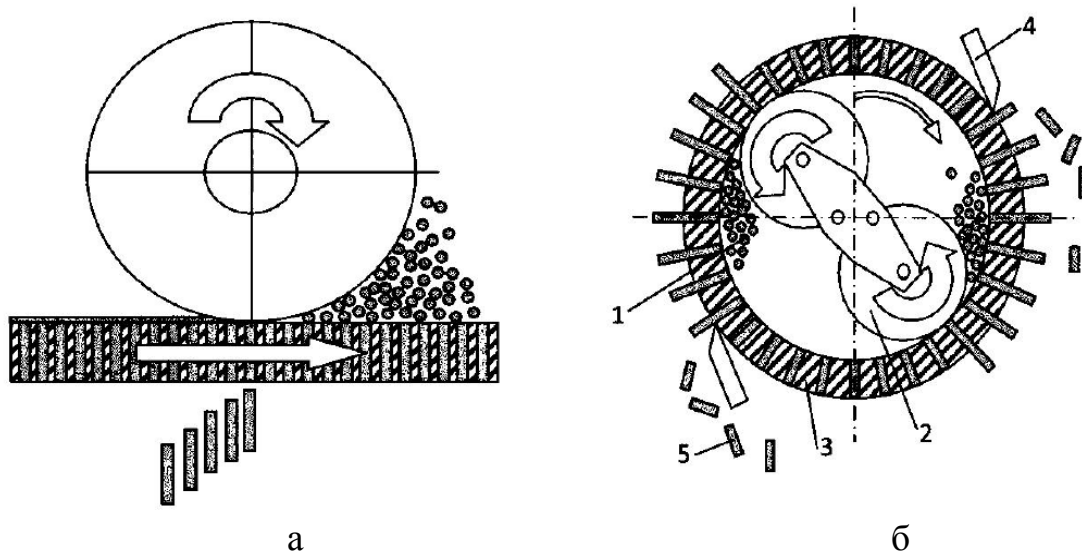


Рисунок 1.20 – Обладнання з виробництва пелет для дрібних підприємств

З аналізу різних технологій компактування [28, 29, 30] можна зробити висновок, що процеси пелетоутворення і брикетування рослинних відходів з виготовленням брикетів і пелет є найбільш раціональними для виробництва біопалива. Такі процеси реалізується в безперервному режимі, дозволяють отримати вироби об'ємом у 3-5 разів меншим за початковий і мають достатню густину, що поліпшує ефективність їх подальшого використання в якості палива [31].

Виділяють два основних види пелетоутворювачів (прес-грануляторів) – з плоскою і циліндричною матрицею (рис. 1.21) [6, 12].

Преси виготовляються з міцних матеріалів з жорсткими корпусами. У компактних моделях пресів-грануляторів перевага віддається плоским матрицям. Приклади компоновки таких пресів з електроприводом на загальній рамі наведено на рис. 1.22, 1.23 [32, 33].



а – з плоскою матрицею; б – з циліндричною матрицею; 1 – сировина; 2 – притискувальні ролики; 3 – перфорована матриця; 4 – ножі; 5 – пелети

Рисунок 1.21 – Основні схеми пресів-грануляторів



Рисунок 1.22 – Варіант компоновки преса-гранулятора і елек-тропривода на загальній рамі

У верхній частині корпусу преса-гранулятора розміщується робочий вузол – матриця з притискувальними роликами (рис. 1.24) [33]. Матриця і ролики виготовлені із спеціальних загартованих зносостійких сплавів.



Рисунок 1.23 – Варіант компоновки преса-гранулятора (у розібраному стані) і електропривода



Рисунок 1.24 – Матриця з притискувальними роликками, розташованими в корпусі преса-гранулятора

Плоска матриця звичайно має товщину не менше 20 мм з отворами (фільєрами) комбінованого профілю (рис. 1.25) [33].



Рисунок 1.25 – Набір плоских матриць

Притискувальні ролики (котки) мають зубчасту поверхню, що створює контактне напруження зминання сировини на матриці, тому через філь'єри матриці сировина продавлюється та обрізається ножами.

В конструкціях можуть використовуватись два, три або чотири ролики (рис. 1.26, 1.27) [33]. Розміри притискувальних роликів повинні відповідати робочій площині матриці з отворами.

Циліндричні матриці найчастіше застосовуються у стаціонарних промислових установках (рис. 1.28, 1.29) [34].

При виготовленні палива у вигляді брикетів, відходи рослинного походження пресуються переважно на шнекових, гідравлічних та штемпельних (пуансонних) пресах різних конструкцій [6]. Перевагою таких пресів, що характеризуються зміною тиску в камері пресування, у порівнянні з грануляторами для виготовлення пелет, є зниження вимог до фракційного складу сировини перед пресуванням та можливість створювати брикети підвищеної густини.



Рисунок 1.26 – Варіант преса-гранулятора з двома притискувальними роликами



Рисунок 1.27 – Варіант преса-гранулятора з чотирма роликами



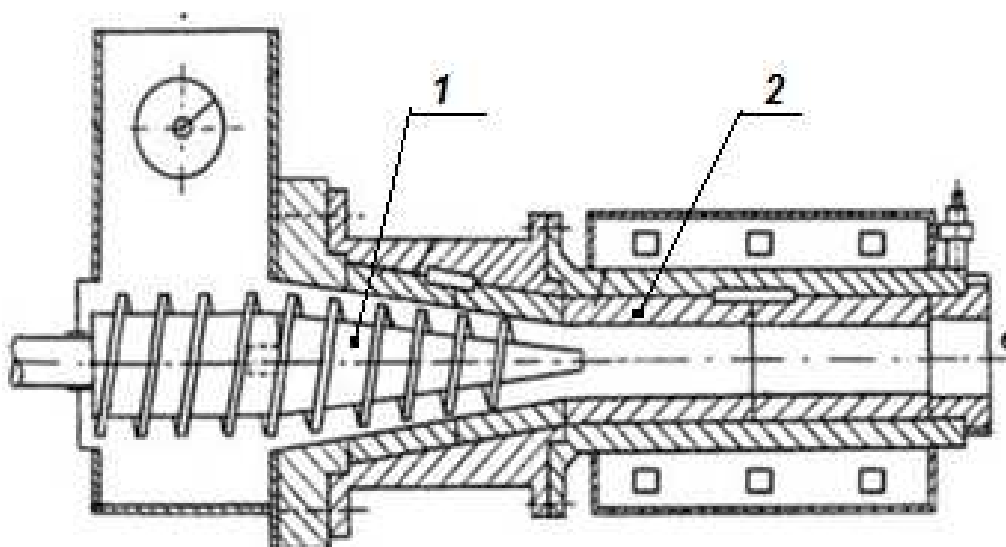
Рисунок 1.28 – Циліндрична матриця з роликом



Рисунок 1.29 – Сформовані пелети на виході з циліндричної матриці

Деяке обладнання для виготовлення біопалива з твердих рослинних відходів наведено в додатках Б, В, Г і Д.

В шнекових пресах (рис. 1.30) формування матеріалу відбувається при одночасному її просуванню по циліндру преса. Недоліком шнекових пресів є виготовлення брикетів невисокої густини, а гідравлічних – невисока продуктивність [6].

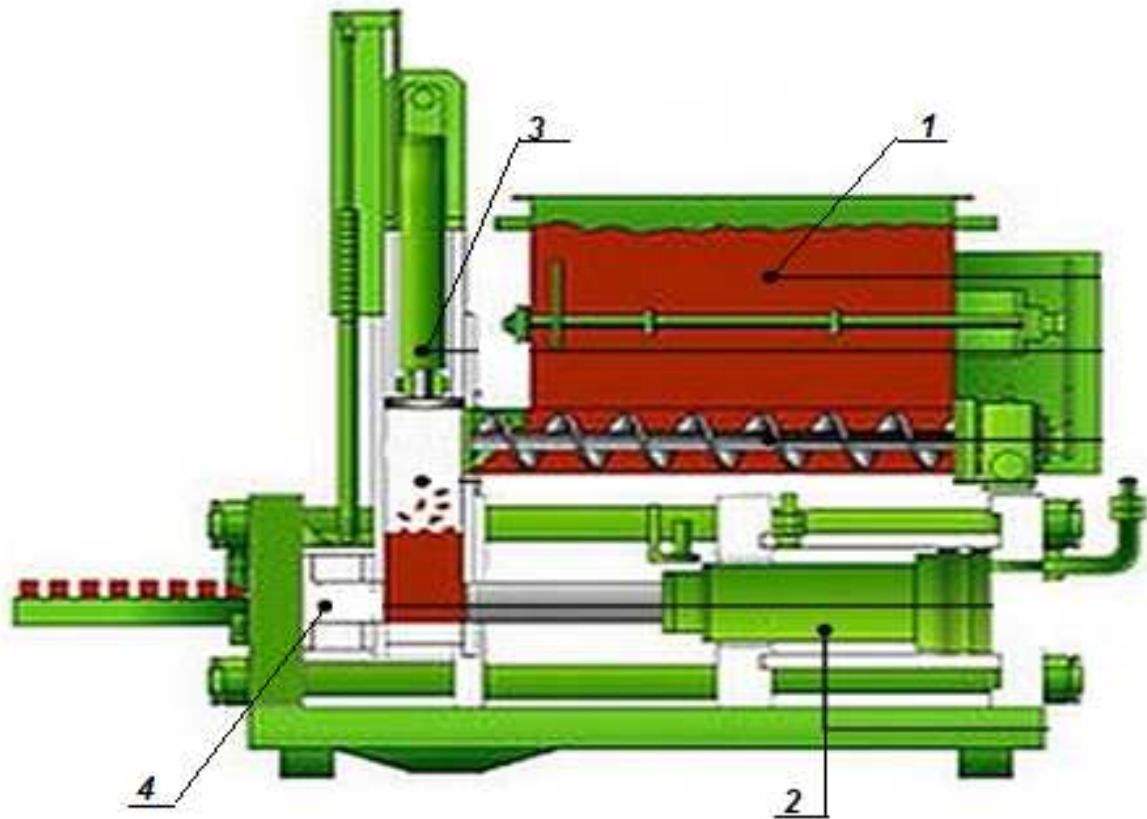


1 – пресувальний шнек; 2 – формуюча матриця

Рисунок 1.30 – Шнековий прес

У відомих конструкціях штемпельних пресів (рис. 1.31) застосовується вертикальна подача біосировини та її стискання і брикетування горизонтально розміщеним пуансоном. Їх недоліком є те, що в процесі вертикальної подачі необхідно здійснювати попереднє ущільнення сировини, а отримане біопаливо має нерівномірну густину.

Штемпельні преси з розміщенням пуансона у вертикальній площині можуть мати перевагу при виготовленні біопалива, оскільки в них не обов'язково здійснювати попереднє ущільнення сировини, а отримане біопаливо матиме рівномірну та більш високу густину, в порівнянні з горизонтальним розміщенням пуансона, при однакових зусиллях стискування [35].



1 – бункер сировини; 2 – головний пресувальний циліндр;
 3 – гідроциліндр попереднього ущільнення; 4 – камера пресування
Рисунок 1.31 – Пуансонний або штемпельний прес

Експериментальні дані, приведені в літературних джерелах стосовно виготовлення біопалива з рослинних відходів, зокрема сумішей на їх основі, на пресі з вертикальним пуансоном малочисельні та мають розрізнений характер.

Розділ 2

ЧИННИКИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРОЦЕСИ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА

На енергозатрати в процесі виготовлення пелет і брикетів з рослинної сировини та їх якість суттєво впливають такі основні параметри: фізико-механічні характеристики біосировини; технологічні: створюваний на неї тиск і температура та конструктивні: геометричні розміри та компоновка матриці або камери пресування, шорсткість їх бічної поверхні [5, 6, 9, 31, 36, 37].

Між цими параметрами немає чіткого функціонального зв'язку. Наприклад, з практики виробництва пелет відомо, що інколи солома одного і того ж сорту пшениці з різних полів гранулюється з різними кінцевими фізико-механічними характеристиками, а з деяких ділянок взагалі не вдається отримувати пелети задовільної якості [14].

2.1. Вплив фізико-механічних властивостей твердих рослинних відходів та технологічних параметрів на якість виготовленого біопалива

Вплив основних параметрів технологічного процесу виготовлення біопалива з твердих рослинних відходів на його реологічні властивості. Якість виготовленого біопалива з твердих рослинних відходів значно залежить від його реологічних властивостей, зокрема пружності, пластичності, в'язкості [38, 39], що характеризуються модулем Юнга та коефіцієнтом Пуассона.

В роботі [39] вивчалась залежність коефіцієнта Пуассона спресованої деревинної тирси сосни від тиску пресування. Встановлено, що коефіцієнт Пуассона зі зростанням тиску спочатку зростає, а після досягнення тиску пресування 8...10 МПа, зменшується за асимптотою.

Абсолютна величина коефіцієнта Пуассона тим вище, чим нижче вологість початкової деревинної тирси (рис. 2.1).

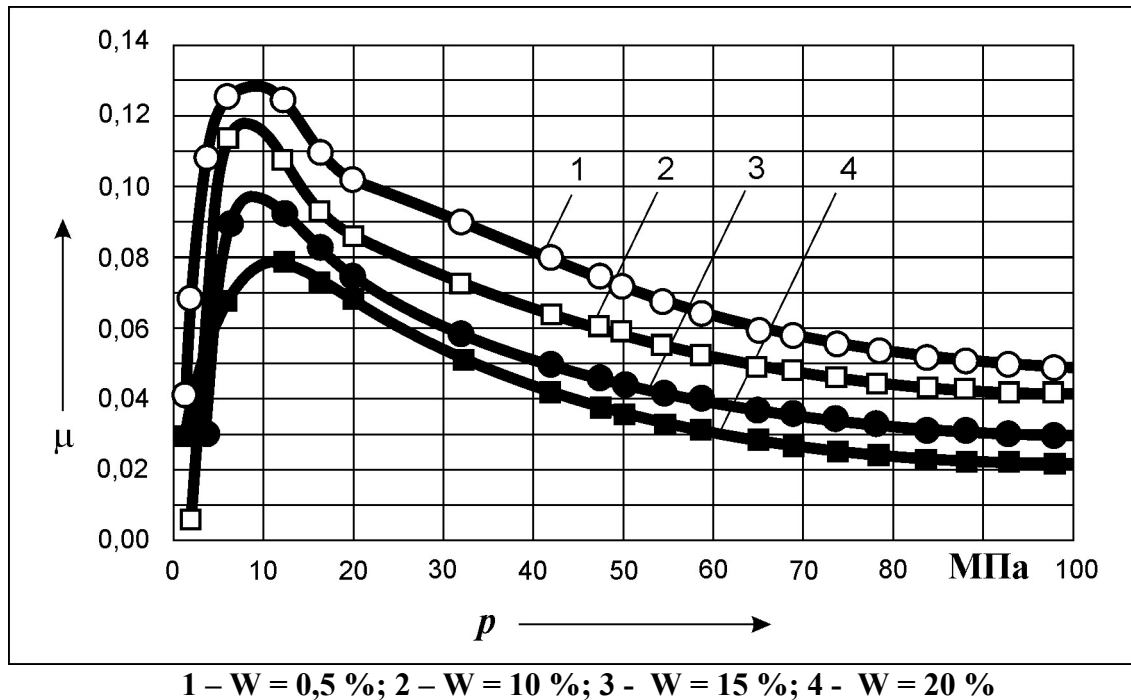
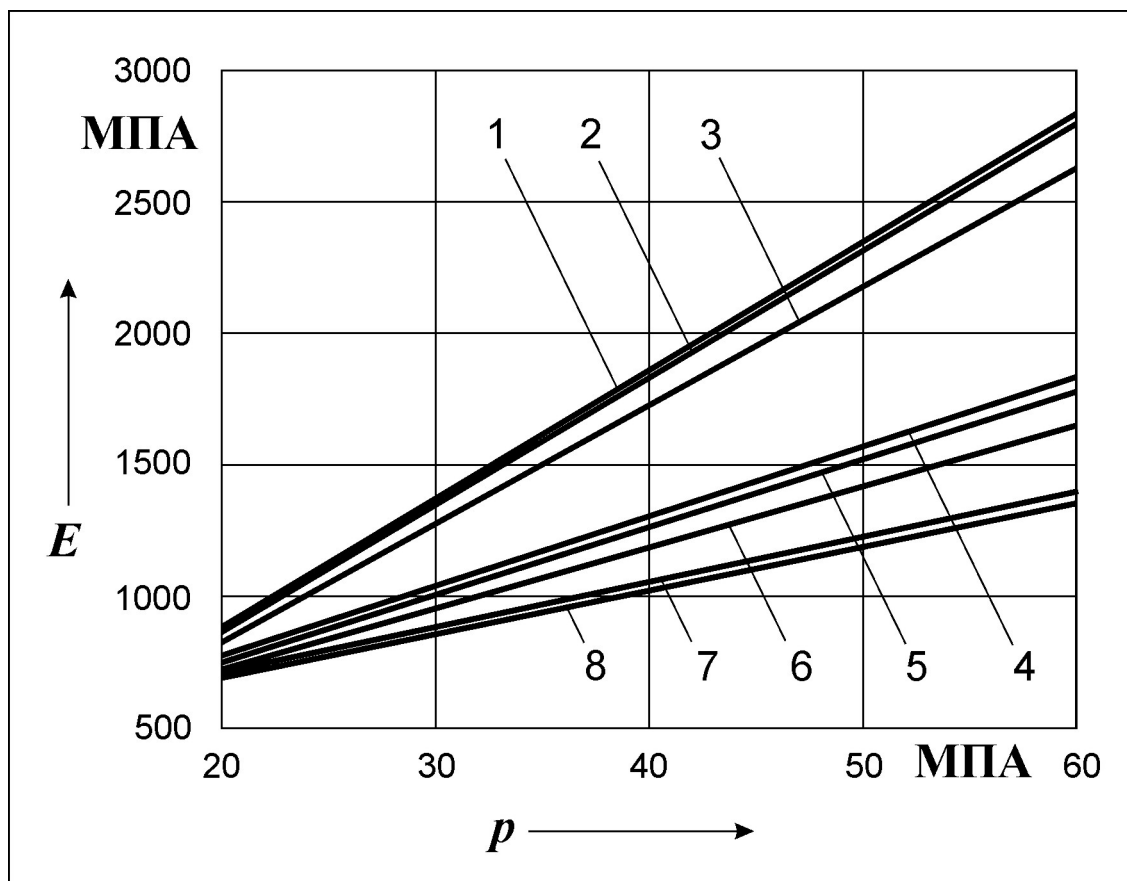


Рисунок 2.1 – Вплив тиску p пресування тирси з сосни фракційним складом $\delta \leq 2$ мм на коефіцієнт Пуассона μ в залежності від її вологості W

Аналогічна залежність зміни коефіцієнта Пуассона спостерігається при зміні фракційного складу і виду деревини (береза, ялина). Для оптимальної вологості за умовою ущільнення ($W = 10\%$) при тиску пресування $p = 20 \dots 30$ МПа коефіцієнт Пуассона пропонується приймати $\mu = 0,07 \dots 0,08$.

Дослідження модуля Юнга на стиснення для спресованої деревинної тирси показали, що його величина на стиск прямо пропорційна тиску, при якому тирса була спресована (рис. 2.2). При зростанні температури величина модуля Юнга знижується, причому найбільше його зниження спостерігається при зростанні температури спресованої тирси до 100°C . При подальшому зростанні температури зниження модуля Юнга на стиск різко гальмується.



1 - $\delta \leq 0,5$ мм, $t = 24^\circ\text{C}$; 2 - $\delta \leq 1$ мм, $t = 24^\circ\text{C}$; 3 - $\delta \leq 2$ мм, $t = 24^\circ\text{C}$; 4 - $\delta \leq 0,5$ мм, $t = 100^\circ\text{C}$; 5 - $\delta \leq 1$ мм, $t = 100^\circ\text{C}$; 6 - $\delta \leq 2$ мм, $t = 100^\circ\text{C}$; 7 - $\delta \leq 0,5$ мм, $t = 150^\circ\text{C}$; 8 - $\delta \leq 1$ мм, $t = 100^\circ\text{C}$

Рисунок 2.2 – Залежність модуля Юнга E від тиску пресування p

При рекомендованому тиску пресування деревинних пелет $p = 30$ МПа модуль Юнга стиснення E при робочих температурах у камері пресування $t = 100 \dots 150^\circ\text{C}$ складає для тирси з ялини 900 МПа, для тирси з сосни – 900...1000 МПа і для тирси з листяних порід – 600...700 МПа.

Для визначення модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона було запропоновано методику та проведено експериментальні дослідження з використанням спеціального пресувального обладнання, яке забезпечує високий тиск (400-500 МПа) ущільнення рослинних відходів, як дисперсного матеріалу, до стану з незначним об'ємним вмістом газорідної фази [40, 41].

Згідно цієї методики було проведено експериментальні випробування зразків з різних матеріалів (лузги соняшника та гречки,

стружки сосни та дуба, соломи та висівки) на універсальній випробувальній машині TIRATEST-2151 і за результатами досліджень отримано діаграми деформування зразків (рис. 2.3).

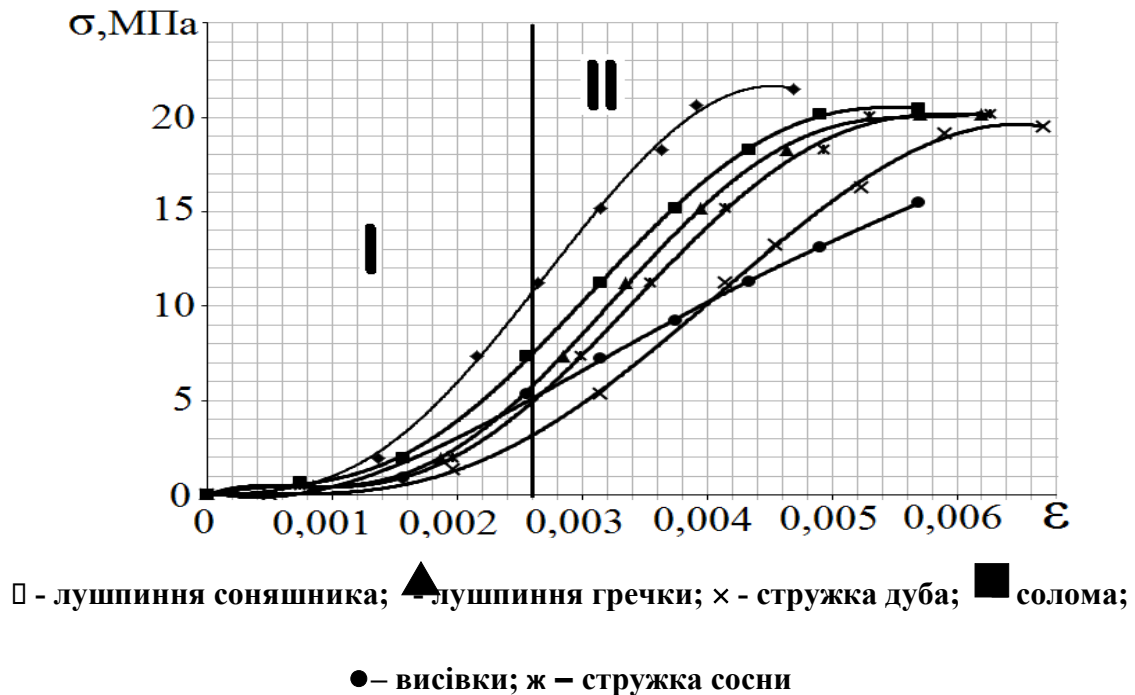


Рисунок 2.3 – Діаграми деформування зразків

За записаними діаграмами деформування були визначені $E = (P/F) / (\Delta h/h)$ - модуль пружності зразка (тангенс кута нахилу лінійної ділянки діаграми деформування у координатах "напруження σ – відносна деформація Δ ") МПа, де $\sigma = P/F$; $\varepsilon = \Delta h/h$; P – сила стиснення, що прикладена до зразка; F - площа поперечного перерізу зразка.

Для визначення коефіцієнта Пуассона проводили вимірювання геометричних розмірів зразка до навантаження та після за виразом [42]:

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|,$$

де ε' - деформація в поперечному напрямку, ε – повздовжня деформація.

Аналіз отриманих діаграм показує, що досліджувані матеріали є нелінійно пружними. На першій ділянці модуль Юнга є змінним в залежності від прикладеного навантаження. Це обумовлено тим, що на

даній ділянці проходить поступове зникнення порожнин між частинками дисперсної фази, що утворились в результаті часткової релаксації матеріалу.

На другій ділянці, характер якої близький до лінійного, величина модуля Юнга залишається сталою (похибка в межах 5 % - 15 %). На цієї ділянці відбувається деформування безпосередньо твердої фази матеріалу. Для визначення модуля пружності умовно компактного матеріалу використовувались параметри діаграми саме на другій ділянці. В результаті обробки отриманих даних були розраховані модулі Юнга та коефіцієнти Пуассона для твердої фази лузги соняшника та гречки, стружки сосни та дубу, соломи та висівки (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 - Результати вимірювань модуля пружності та коефіцієнта Пуассона для твердої фази досліджуваних зразків

№ п/п	Тип сировини досліджуваного зразка	Коефіцієнт Пуассона	Модуль Юнга E , ГПа
1	Лушпиння соняшника	0.125	3.4407
2	Стружка сосни	0.118	2.6804
3	Лушпиння гречки	0.123	3.1254
4	Стружка дуба	0.127	2.9874
5	Солома	0.124	3.1584
6	Висівки	0.134	2.1458

Оцінка пружних коефіцієнтів двохкомпонентного композитного зразка біопалива за значеннями пружних коефіцієнтів складових.

Нехай складові двохкомпонентної композитної гранули відповідно задаються модулями Юнга E_1 , E_2 і коефіцієнтами Пуассона ν_1 , ν_2 . Співвідношення складових будимо характеризувати об'ємною концентрацією $\gamma_1 = V_1/V$, де V_1 - об'єм першої складової, V - об'єм всієї гранули. Згідно з теорією ефективного модуля даному композиту ставиться у відповідність однорідне середовище, для якого необхідно визначити вказані пружні характеристики.

Підходи Фойгта і Рейсса разом з варіаційним принципом Лагранжа дозволяють визначити певні проміжки для значень деяких ефективних коефіцієнтів [43]. У відповідності з цими підходами модуль зсуву μ та модуль стиснення K задовольняють наступним нерівностям:

$$\mu_r \leq \mu \leq \mu_f, \quad K_r \leq K \leq K_f. \quad (2.1)$$

Модулі Фойгта і Рейсса визначаються через модулі складових компонентів за наступними формулами:

$$\mu_f = \gamma_1 \mu_1 + (1 - \gamma_1) \mu_2, \quad \mu_r = \frac{\mu_1 \mu_2}{(1 - \gamma_1) \mu_1 + \gamma_1 \mu_2}, \quad (2.2)$$

$$K_f = \gamma_1 K_1 + (1 - \gamma_1) K_2, \quad K_r = \frac{K_1 K_2}{(1 - \gamma_1) K_1 + \gamma_1 K_2}. \quad (2.3)$$

Інтервали можливих значень ефективних модулів, які задаються формулами (2.1)-(2.3), часто виявляються достатньо великими. У деяких випадках вказані інтервали можна суттєво зменшити, якщо скористатися варіаційним принципом Хашіна-Штрикмана [43, 44]. Варіаційний принцип Хашіна-Штрикмана є узагальненням варіаційного принципу Лагранжа. Він був розроблений авторами для дослідження неоднорідних пружних матеріалів. Разом з неоднорідним тілом, яке досліджується, розглядається деяке однорідне пружне тіло (тіло порівняння). На основі лагранжіана будується функціонал, який має мінімум в положенні рівноваги, якщо тензор модулів пружності тіла, що досліджується, «менше» тензора модулів пружності тіла порівняння і має в положенні рівноваги максимум, якщо тензор модулів пружності «більше» тензора модулів пружності тіла порівняння. Якщо $K_1 > K_2$ і $\mu_1 > \mu_2$, то вказаний підхід дає наступні співвідношення для модуля зсуву та модуля стиснення:

$$\mu_h \leq \mu \leq \mu_s, \quad K_h \leq K \leq K_s, \quad (2.4)$$

де:

$$K_h = \frac{K_1 K_2 + \frac{4}{3}(1 - \gamma_1)\mu_2 K_2 + \frac{4}{3}\gamma_1 \mu_2 K_1}{K_1 + \frac{4}{3}\mu_2 - \gamma_1(K_1 - K_2)}, \quad (2.5)$$

$$K_s = \frac{K_1(K_2 + \frac{4}{3}\gamma_1 \mu_1 K_2) + \frac{4}{3}(1 - \gamma_1)\mu_1 K_2}{K_1 + \frac{4}{3}\mu_1 - \gamma_1(K_1 - K_2)}, \quad (2.6)$$

$$\mu_h = \frac{5\gamma_1(\mu_1 - \mu_2)(3K_2 + 4\mu_2)\mu_2}{5(3K_2 + 4\mu_2)\mu_2 + 6(\mu_1 - \mu_2)(K_2 + 2\mu_2)(1 - \gamma_1)}, \quad (2.7)$$

$$\mu_s = \frac{5(1 - \gamma_1)(\mu_2 - \mu_1)(3K_1 + 4\mu_1)\mu_1}{5(3K_1 + 4\mu_1)\mu_1 + 6(\mu_2 - \mu_1)(K_1 + 2\mu_1)\gamma_1}. \quad (2.8)$$

Застосуємо наведені вище підходи до деяких конкретних матеріалів. Модуль зсуву і модуль стиснення можна виразити через модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (2.9)$$

Визначаємо спочатку K_1, K_2, μ_1, μ_2 . За допомогою формул (2.2), (2.3), (2.5)-(2.8) обчислюємо $K_f, K_r, \mu_f, \mu_r, K_h, K_s, \mu_h, \mu_s$. В якості технічних характеристик композита можна взяти середнє арифметичне відповідних величин, а саме

$$\mu_{rf} = \frac{\mu_r + \mu_f}{2}, K_{rf} = \frac{K_r + K_f}{2}, \mu_{hs} = \frac{\mu_h + \mu_s}{2}, K_{hs} = \frac{K_h + K_s}{2}. \quad (2.10)$$

На основі (2.9) отримуємо формули оберненого переходу:

$$\nu = \frac{3K - 2\mu}{2(3K + \mu)}, \quad E = \frac{9K\mu}{3K + \mu}. \quad (2.11)$$

Використовуючи (2.11) визначаємо K_{rf} , μ_{rf} , K_{hs} , μ_{hs} .

Таблиця 2.2 – Результати обчислень пружних коефіцієнтів для композитних пелет по значенням складових

компонент 1	ν_1	E_1	K_1	μ_1	K_h	μ_h	K_r	μ_r	ν_{hs}	E_{hs}
компонент 2	ν_2	E_2	K_2	μ_2	K_s	μ_s	K_f	μ_f	ν_{rf}	E_{rf}
пластик	0,41	2750	5093	975,2	-	-	4465	1047	-	-
вугілля	0,37	3100	3974	1131	-	-	4533	1053	0,392	2924
дерево сосна	0,118	2680	1169	1199	-	-	1807	1164	-	-
вугілля	0,37	3100	3974	1131	-	-	2572	1165	0,274	2967
солома	0,124	3158	1400	1405	-	-	2196	1151	-	-
пластик	0,41	2750	5093	975,2	-	-	3246	1190	0,312	3071
солома	0,124	3158	1400	1405	1280	1297	1274	1294	0,121	2909
дерево сосна	0,118	2680	1169	1199	1280	1298	1285	1302	0,121	2909
лушпиння соняшника	0,125	3441	1529	1529	1463	1466	1462	1464	0,125	3297
солома	0,124	3158	1400	1465	1463	1466	1465	1467	0,125	3296
лушпиння соняшника	0,125	3441	1529	1529	1338	1353	1325	1344	0,122	3037
дерево сосна	0,118	2680	1169	1199	1340	1354	1349	1364	0,122	3037
дерево дуб	0,127	2987	1335	1325	1250	1,26	1247	1259	0,123	2830
дерево сосна	0,118	2680	1169	1199	1250	1,26	1252	1262	0,123	2829

В таблиці 2.2 наведені результати обчислень пружних коефіцієнтів для деяких композитних пелет по значенням складових. У всіх випадках значення коефіцієнта Юнга задавались у МПа, а $\nu_1 = 0,5$. Пружні

коефіцієнти складових бралися з літератури і є наближеними. Підходи Фойгта і Рейсса можуть бути застосовані до будь-якого композита, але вони визначають досить широкий діапазон можливих значень відповідних пружних коефіцієнтів. Вилка Хашіна-Штрикмана є значно вужчою для наведених матеріалів, але вона визначається не для всіх композитів. Останній підхід може бути застосований лише при одночасному виконанні умов $K_1 > K_2$ і $\mu_1 > \mu_2$. Якщо $\nu_1 = \nu_2$, то з (2.9) випливає, що вказані нерівності гарантовано виконуються при $E_1 > E_2$. Якщо ж, наприклад, ν_1 збільшується при сталому значенні ν_2 , то це призводить до збільшення K_1 і зменшення μ_1 , що в свою чергу тягне порушення наведених вище умов. Таким чином підходи Хашіна і Штрикмана можуть бути застосовані лише у тих випадках, коли значення коефіцієнтів Пуассона складових близькі між собою.

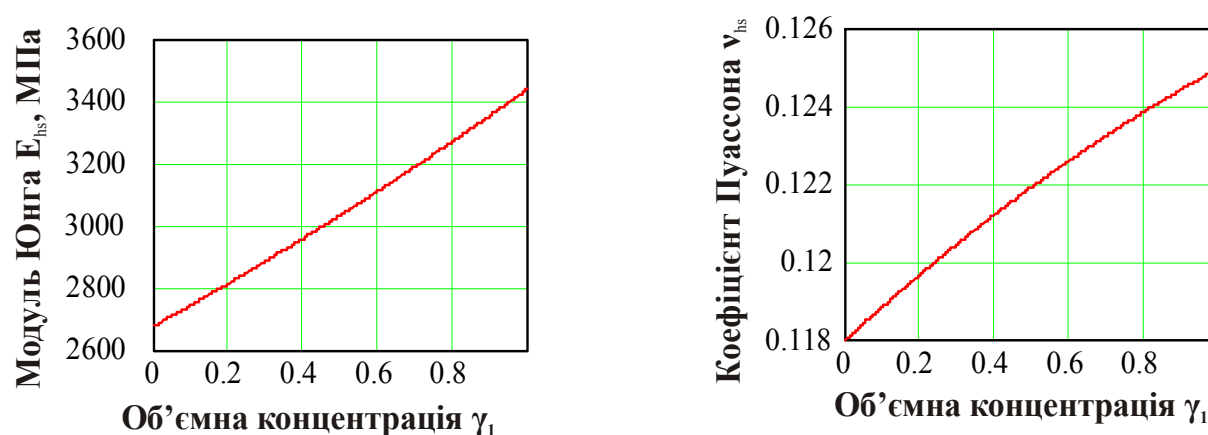


Рисунок 2.4 – Залежність модуля Юнга E_{hs} і коефіцієнта Пуассона ν_{hs} від об'ємної концентрації γ_1

Рисунок 2.4 демонструє залежності модуля Юнга E_{hs} і коефіцієнта Пуассона ν_{hs} від об'ємної концентрації γ_1 . Розрахунки зроблені для двохкомпонентного композита «лушпиння соняшника - дерево сосна».

Вплив вологості рослинних відходів. В залежності від виду рослинних відходів подрібнена сировина перед пресуванням повинна мати оптимальну вологість. Сировина з низькою вологістю важко піддається пресуванню, при значеннях вологості біосировини, які перевищують

оптимальні, виготовлені гранули втрачають міцність та енергетичну цінність, що впливає на ціну біопалива. Оптимальні значення вологості біосировини дозволяють забезпечити якісні показники виготовленого біопалива, знизити енерговитрати при їх виготовленні, підвищити теплоту згоряння та зменшити утворення шкідливих викидів в атмосферу.

На сьогодні з літературних джерел не можна зробити однозначний висновок про величину оптимального значення вологості сировини перед пелетуванням. Наприклад, в деяких дослідженнях вказується, що для виготовлення гранул високої густини, біосировина повинна мати вологість нижче 10 % [45].

В роботі [46] констатується, що в процесі ущільнення вода являє собою зв'язувальну речовину, підвищує площу контакту часточок і сприяє їх склеюванню. Але збільшення вмісту води від оптимального діапазону (значення якого не вказується) знижує міжмолекулярні сили. Робиться висновок, що оптимальний рівень вмісту води для процесу ущільнення відрізняється в залежності від типу біомаси і умов процесу.

Рекомендації за вмістом вологості відрізняються навіть по однаковому виду рослинних відходів. Наприклад, для деревини вважаються за оптимальні значення 6-12 % [47], 10-12 % [48]. Разом з тим експериментальними дослідженнями встановлено, що найвищі значення густини пелет, виготовлених з сировини ялинкових дерев, досягаються при значенні вологості приблизно 15 % [49].

Загальні значення вологості для рослинних відходів сільсько-господарських культур рекомендовані в межах 12-14 %. Так, для пелет, що виготовляються з соломи, рекомендовані значення вологості 8-12 %, а оптимальне значення її вологості перед пресуванням повинно складати 10 ± 1 % [12].

Використання сировини з вологістю, що перевищує оптимальні значення, приводить до зниження якісних показників пелет, в тому числі енергетичної цінності, або навіть до їх руйнування в процесі зберігання.

Вплив фракційного складу. На створення зменшених розмірів часточок біосировини перед виготовленням пелет вказується в дослідженнях [45]. В роботі «Modeling the effect of extrusion parameters on density of biomass pellet using artificial neural network» [46] визначено зменшення густини пелет зі збільшенням розмірів частинок, що також узгоджується з результатами дослідження [50], де показано, що густина відходів пшеничної соломи і проса зменшується з підвищенням розміру часточок.

Вплив неоднорідності фізико-механічних властивостей рослинної маси, зокрема геометричних розмірів частинок стебел (соломи) на зміну густини біопалива залежно від тиску вивчалось в роботі С. Левка [51].

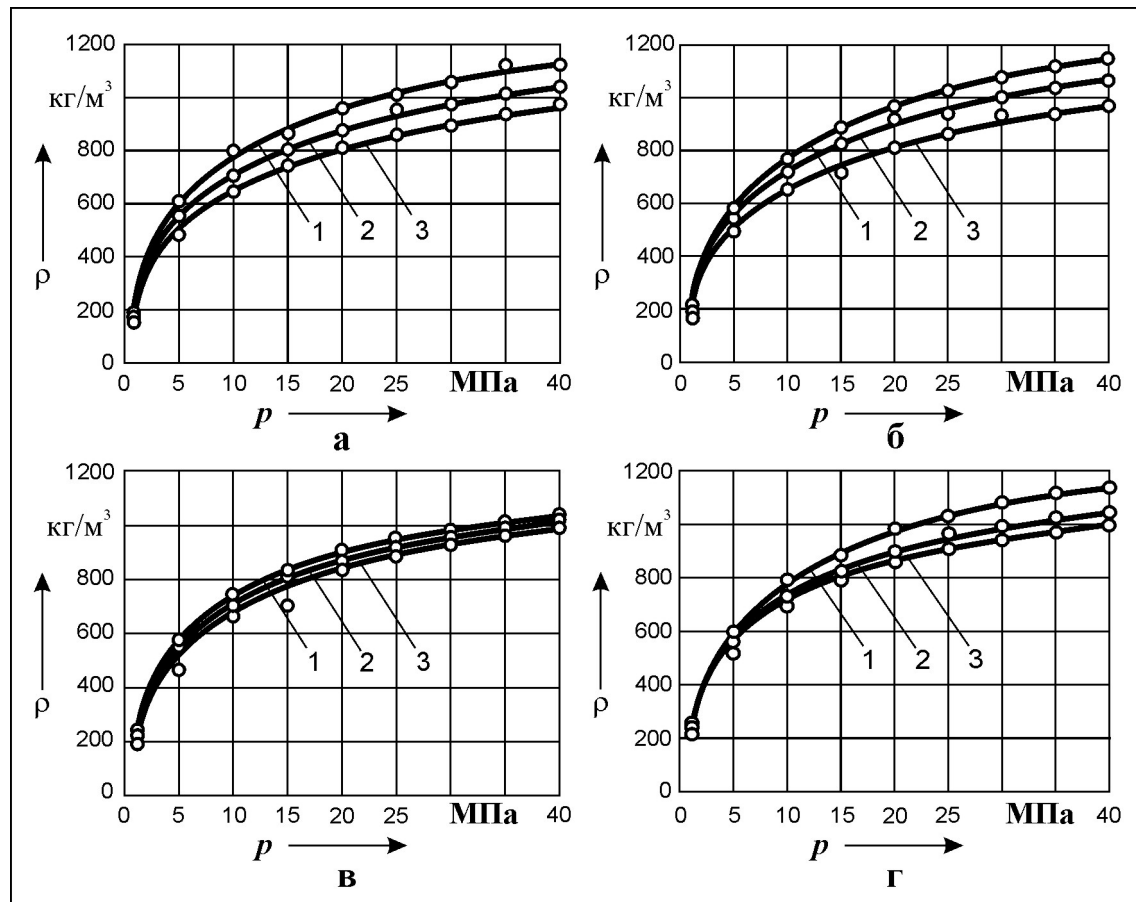
В дослідженнях використовували соломку озимої пшениці та вівса (вологістю 14 %), озимого ріпаку (вологістю 16 %) та очерету (вологістю 15 %), які були подрібнені на довжину 5, 10 і 20 мм.

Досліджуваний матеріал засипали в циліндр та за допомогою гвинтового механізму і повзуна на важелі терезів встановлювали відповідне навантаження стискування .

Після експериментів визначали об'єм зразків, їх масу і густину. Результати експериментів показані на графіках (рис. 2.5).

Аналіз результатів досліджень показав, що густина брикету із соломи пшениці (рис. 2.5, а) за однакового тиску є дещо більшою для довжини подрібнення 5 мм (становить 1146 кг/м^3), ніж для довжин 10 і 20 мм. Це зумовлено тим, що за більш подрібнених частинок соломи утворюється менше порожнин і наростання густини відбувається швидше.

Густина соломи вівса (рис. 2.5, б) дещо відрізняється для довжин подрібнення 5, 10, 20 мм і змінюється в межах $900 \dots 1150 \text{ кг/м}^3$ за тиску 40 МПа. Це зумовлено досить низькою вологістю та високою міцністю стебел.



а – солома пшениці; б – солома вівса; в – солома ріпаку; г – стебла очерету; 1 – $l = 5$ мм; 2 – $l = 10$ мм; 3 – $l = 20$ мм.

Рисунок 2.5 – Залежність густини від рослинної маси тиску для різної довжини подрібнення

Густина соломи ріпаку (рис. 2.5, в) для різних довжин подрібнення практично не відрізняється і становить близько 1000 кг/м^3 за тиску $35\ldots 40$ МПа. Це зумовлено тим, що стебла ріпаку, на відміну від стебел колосових культур, є щільнішими і не мають внутрішніх пустот.

Густина брикетів із стебел очерету (рис 2.5, г) при довжині подрібнення 5 мм є вищою, ніж для 10 і 20 мм і складає 1140 кг/м^3 внаслідок того, що під час подрібнення стебел на меншу довжину їх частинки в більшій мірі плющуються та руйнуються.

Отримані експериментальні дані показали, що за однакових тисків найбільша густина досягається при подрібненні рослинного матеріалу до розмірів 5 мм, а найменша – за довжини 20 мм. Для стебел ріпаку така відмінність незначна завдяки будові та складу стебла.

Також з результатів дослідів [51] визначено, що зі збільшенням

тиску (зусилля пресування) наростання густини поступово зменшується, що пояснюється інтенсивним витісненням пустот з маси в початковий період пресування. В процесі ущільнення зв'язок густини виробу і тиску пресування описується логарифмічною функцією

$$P = a \cdot e^{c\rho},$$

де P – тиск у робочому каналі; ρ – густина брикета; a і c – емпіричні коефіцієнти, що залежать від механіко-технологічних властивостей рослинного матеріалу та конструктивних параметрів преса.

В експериментах було задіяно незначний перелік твердих рослинних відходів і не визначено оптимальну довжину їх подрібнення для виготовлення біопалива з високою густиною.

Деякі дослідники [52] для підвищення якості гранул рекомендують приводити часточки сировини до одного розміру шляхом здрібнення у спеціальному обладнанні або розділенню за допомогою сит з отворами певних діаметрів.

В роботі [49] досліджувалось вплив фракційного складу відходів деревини ялинкових порід на густина пелет. Було встановлено, що найвищі значення густини досягалися для фракції з розміром частинок ≤ 2 мм.

Проведений аналіз показав, що виготовлення якісного біопалива вимагає підготовки біосировини зі зменшеним фракційним складом.

Але треба враховувати, що надмірне подрібнення сировини вимагає додаткових затрат енергії і призведе до зростання вартості біопалива. Крім того, нез'ясований вплив фракційного складу біосировини на енергетичні показники пресового обладнання. Так, в роботі [53] автор робить висновок, що зменшення розміру часточок початкової сировини приводить до зменшення навантаження на головний двигун пресувальних механізмів, а у висновках датських науковців [54] наводиться протилежний висновок: тиск при пресуванні збільшується при зменшенні фракційного складу біосировини.

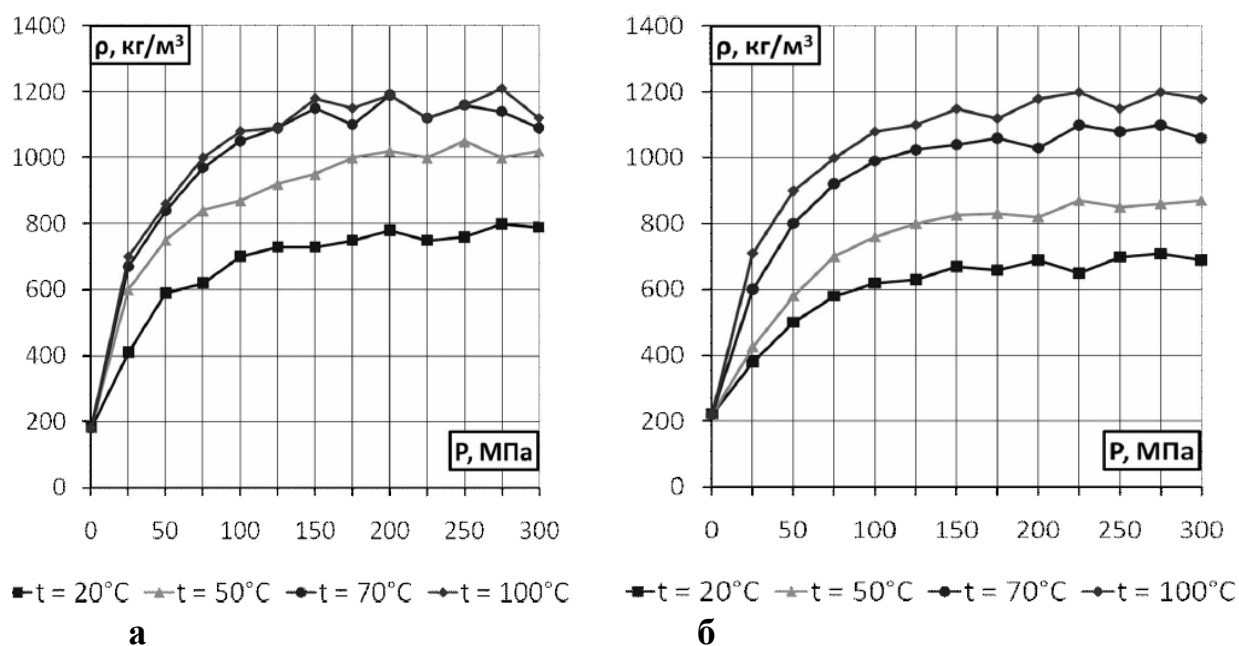


Рисунок 2.7 – Графіки залежності густини пелет ρ від тиску пресування P при різних температурах пресування: а - для стружки сосни; б – для стружки дубу

Аналіз наданих графіків показує, що з підвищенням температури рослинних відходів від 20 до 100 °С відбувається підвищення густини виготовлених зразків гранул, що можна пояснити розчиненням лігніну з підвищенням температури [57].

Результати проведених експериментів показали, що підвищення температури сировини вище 100 °С є недоцільним, оскільки майже не впливає на підвищення густини гранул, але підвищує енерговитрати.

В роботі [31] досліджувалась закономірність впливу температури сировини в каналі прес-матриці на якість гранул при пресуванні екструзією. На базі гідравлічного пресу 2135-1М була 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 рослинних відходів (стружка сосни, стружка дуба, лушпиння соняшника, лушпиння гречки, солома, висівки) показав, що при збільшенні температури сировини в прес-матриці до 150 °С підвищує густину зразків,

але подальше підвищення температури призводить до їх зниження (рис.2.8). Такий процес пояснюється розчиненням лігніну під впливом підвищення температури.

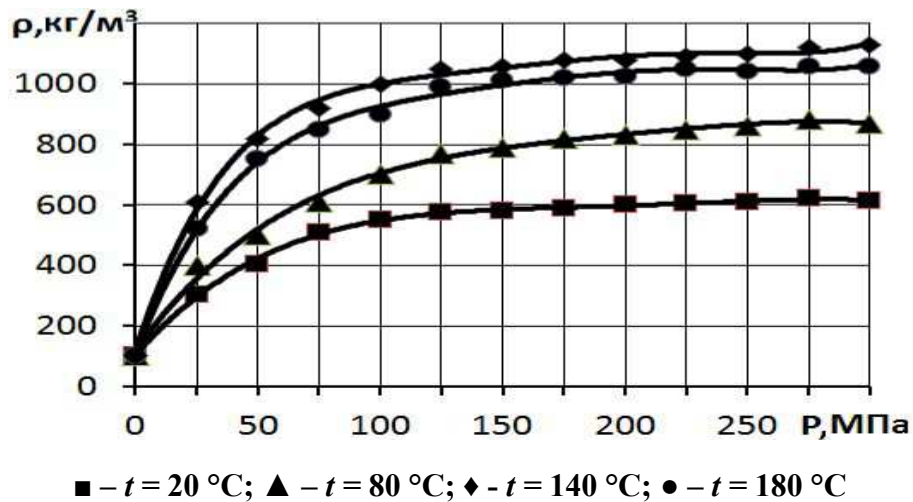


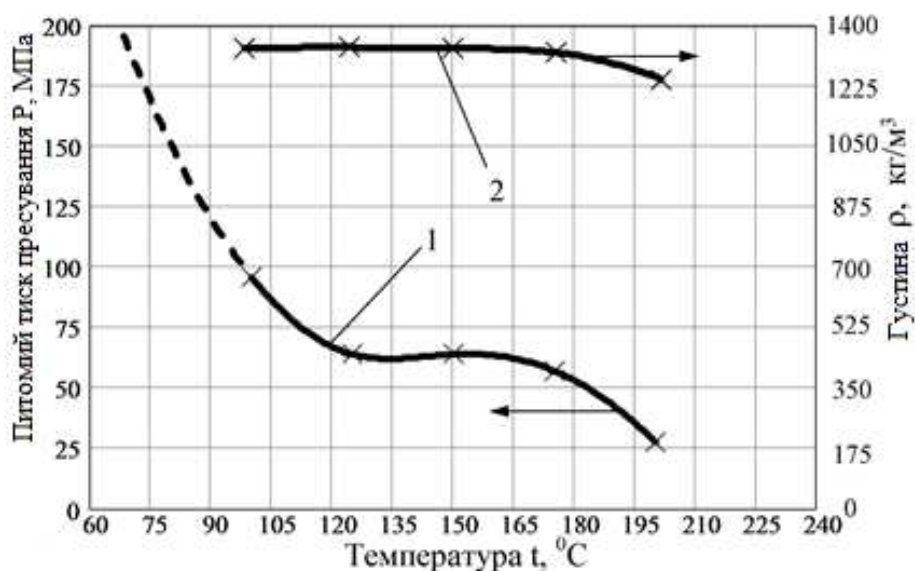
Рисунок 2.8 – Графіки залежності густини пелет ρ , кг/м³ від тиску пресування P , МПа в залежності від температури t , °C

В роботі робиться висновок, що результати проведених досліджень дозволили визначити раціональний діапазон температур 140-160 °C для пресування досліджуваних рослинних відходів.

Однак є рекомендації, за якими найбільшої міцності набуває біомаса, що пресується за температури понад 150 °C [12]. При цьому верхньою межею температури пресування є 250 °C, коли розпочинається реакція піролізу, тобто відбувається часткове розкладання біомаси. А за даними компанії California Pellet Mill, оптимальна температура гранулювання має бути 88-102 °C [12], оскільки в цьому діапазоні температур забезпечується плавлення лігніну і відсутнє утворення водяної пари, що розриває пелети на виході з фільєр матриці.

Дослідження, проведені на деревинній тирсі показали, що при нагріванні відбувається деструкція її компонентів з утворенням рідкої пластифікованої фази. В діапазоні температур від 75 до 200 °C тирса послідовно переходить з сипкого середовища у сипко-пластичну і в умовно-пластичну [58]. В роботі вказується, що застосування термічної обробки безпосередньо в процесі пелетоутворення деревинних відходів

спричинює різке зниження питомих тисків при високій густині і міцності одержуваних зразків. Графік залежності густини від температури (рис. 2.9, крива 2) показує, що з підвищенням температури від 100 °С густина пелет змінюється незначно і в середньому дорівнює 1300 кг/м³. При цьому питомий тиск пресування значно знижується в діапазоні температур від 100 до 200 °С (рис. 2.9, крива 1).



$$1 - P = f(t); 2 - \rho = f(t)$$

Рисунок 2.9 – Залежність зміни густини пелет і питомого тиску пресування від температури нагріву для березової тирси

Безпосереднє нагрівання матриці дозволяє змінити реологічні властивості речовин, що перероблюються, а саме зробити їх більш пластичними і тим знизити енерговитрати процесу гранулювання.

2.2. Вплив конструктивних параметрів пресового обладнання на процес виготовлення твердого біопалива

Циліндрична або плоска матриця звичайно має філ'єри, що найчастіше складаються з формуючої конусної частини l_6 , калібрувальної циліндричної l_k і вихідної частини l_n , яка має зворотний конус для зменшення тиску сформованих пелет (рис. 2.10) [58, 59].

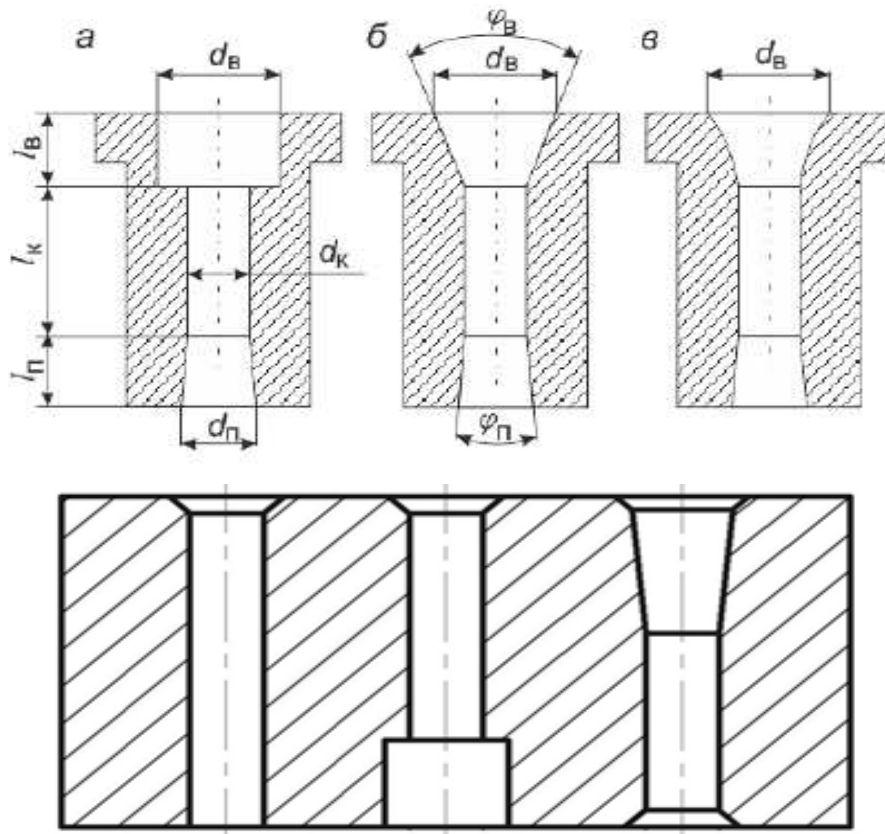


Рисунок 2.10 - Варіанти профілів філ'єр матриці

Основні вимоги до вхідної конусної частини філ'єри матриці:

- точність геометрії та якість поверхні;
- оптимальний опір;
- мінімальні корозія та абразивний знос;
- зручність установки, розборки і чистки філ'єр, безпека.

Важливим елементом філ'єри матриці, що розташовується за конусною її зоною, є калібрувальна (циліндрична) частина, де закінчується процес формування пелет. Її довжина впливає як на їх якість, так і на величину енерговитрат пресового обладнання через ймовірність заклинювання біоматеріалу [60].

Для зняття напруги стисненого матеріалу і остаточного формування пелет, що виключає їх руйнування або розшарування при виході з філ'єри, після циліндричної ділянки забезпечують в ній зону зі зворотним конусом.

Основні задачі калібрувальної частини філ'єри:

- забезпечити точність розмірів перерізу пелет;

- забезпечити відсутність дефектів форми;
- зняти внутрішню напругу в матеріалі;
- одержати поверхню виробу потрібної якості.

Збільшення або зменшення у філ'єрі тиску на біосировину забезпечується:

- зміною співвідношенням довжини філ'єри матриці до поперечного перерізу сумарної площі філ'єр (ступінь формування);
- зміною форми вхідного отвору філ'єри матриці;
- зміною ступеню формування шляхом зміни поперечного перерізу філ'єри матриці.

Варіанти деяких філ'єр матриць з формами звуження вхідної її частини (циліндрична, конічна, криволінійна, з фаскою) наведені на рисунку 2.10.

В роботі [60] критерій відсутності заклинювання, при виконанні якого стиснута сировина буде просуватись по філ'єрі, визначається з виразу:

$$\frac{l}{d} > \frac{4f\mu}{\ln P},$$

де l – довжина калібрувальної частини філ'єри; d – діаметр філ'єри; f – коефіцієнт тертя; μ – коефіцієнт Пуассона; P – відношення граничного тиску до атмосферного.

Кути α і β філ'єри (рис. 2.11) повинні задовольняти умові:

$$\operatorname{tg}\beta = (P\mu)/(2E), \quad \alpha > \beta,$$

де E – модуль Юнга.

Остання умова забезпечує усунення руйнування спресованої гранули при виході з філ'єри і самогальмування біоматеріалу у конусній її частині.

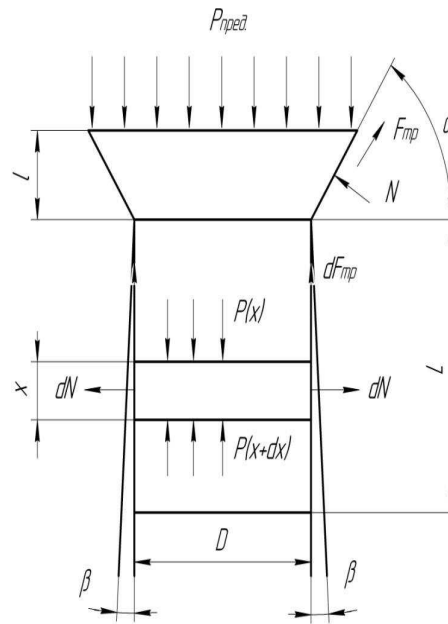


Рисунок 2.11 - Основні параметри і схема дії сил у фільтрі матриці

Одним з основних параметрів, що визначає закономірність формування пелет або брикетів в матриці пресового обладнання є шорсткість її поверхні [61]. Результатами дослідів [62] встановлено, що підвищення величини коефіцієнта тертя поверхні матриці сприяє збільшенню густини гранул, проте значно збільшує енерговитрати на процес пресування.

При русі дисперсного матеріалу по поверхні фільтр, виникають зусилля тертя, що включають в себе зусилля адгезії. Проте, через невисокий вміст води (6% - 12%) в дисперсній сировині, що гранулюється, зусиллями адгезії зазвичай нехтують [63, 64].

В експериментальних дослідженнях [65] визначається вплив шорсткості контактної поверхні на коефіцієнт тертя ковзання. Методика досліджень полягала у проведенні багатфакторного експерименту з наступною статистичною обробкою результатів та створенням відповідних математичних залежностей коефіцієнта тертя при різних швидкостях руху рослинних відходів по поверхням фільтр матриці різної шорсткості. У загальному вигляді така математична залежність має вигляд:

$$f = F(v, Ra),$$

де f – коефіцієнт тертя між біосировиною та поверхнею філ'єри матриці; Ra – шорсткість обробки поверхні отвору формуючої головки; v – швидкість руху сировини, м/с.

З використанням факторного експерименту другого порядку останнє рівняння набуває вигляду полінома [66]:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 x_2 + b_4 x_1^2 + b_5 x_2^2,$$

де y – параметр оптимізації, що асоціюється з коефіцієнтом тертя f ; фактори x_1 та x_2 відповідно з v та Ra .

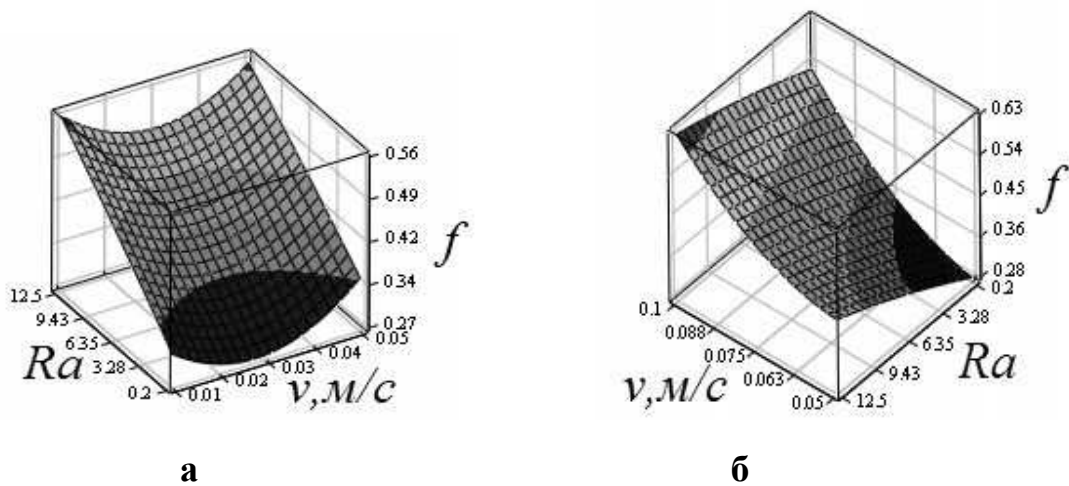
Для проведення комплексу натурних експериментів використовувалась лабораторна установка для дослідження впливу залежності коефіцієнта тертя між рослинними відходами та сталеною контактною поверхнею при різних значеннях шорсткості обробки поверхні та швидкостях руху сировини.

В результаті статистичної обробки результатів експериментів було отримано рівняння регресії (табл. 2.3), що описують залежність коефіцієнта тертя f між рослинними відходами та поверхнею філ'єри матриці при різній шорсткості поверхні Ra та швидкостях руху v сировини.

Таблиця 2.3 – Результати статистичного оброблення результатів експериментів

№	Тип сировини	Рівняння регресії
1	Лушпиння соняшника	$f = 0.3727 - 5,5v + 0.019Ra - 0,0815v \times Ra - 0,0002Ra^2 + 70v^2$
2	Стружка сосни	$f = 0,391 - 9,2v + 0,022Ra - 0,0813v \times Ra - 0,0001Ra^2 + 167,5v^2$

Графічне відображення отриманих рівнянь має вигляд поверхонь відгуку (рис. 2.12), які показують вплив шорсткості Ra обробки поверхні та швидкості руху v біосировини на коефіцієнт тертя f між нею та поверхнею філ'єри матриці.



а – стружка сосни; б – лушпиння соняшника

Рисунок 2.12 – Поверхні відгуку коефіцієнта тертя f сировини від шорсткості Ra поверхні філь'єри матриці та швидкості руху v , м/с

Аналіз отриманих результатів свідчить, що зі збільшенням шорсткості контактної поверхні при мінімальних швидкостях руху сировини коефіцієнт тертя ковзання буде збільшуватись. Зростання коефіцієнта тертя ковзання для стружки сосни при максимальній швидкості руху відбувається за рахунок зміни її властивостей, що обумовлена, насамперед, розчиненням лігніну під впливом підвищення температури, яка підвищується за рахунок інтенсивного тертя між контактними поверхнями [67].

Дослідженнями по пресуванню біопалива доведено, що найкращі умови при стисканні сировини в калібрувальній частини матриці створюються при наявності шорсткості бічної поверхні $Ra = 3,2 \dots 6,3$ мкм, в залежності від матеріалу який застосовується [68].

Найбільш розповсюдженими методами, які застосовуються для обробки матриць окрім слюсарно-механічної є: алмазне шліфування, електрохімічна і електроерозійна обробка [68]. Однак, застосування алмазного шліфування для складнофасонної поверхні матриці не завжди можливо в силу кінематичних особливостей методу і конструкції інструменту. Слюсарно-механічний метод малопродуктивний і вимагає значних витрат висококваліфікованої ручної праці.

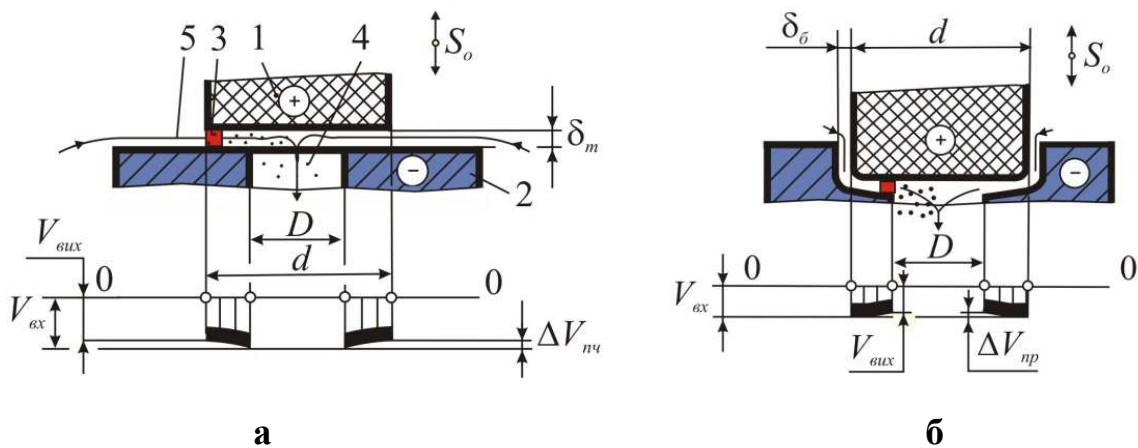
Електрохімічна обробка застосовується для обробки твердо-сплавного і сталевих матеріалів. Вона характеризується високою продуктивністю знімання металу з поверхонь складної форми і малої жорсткості (за рахунок відсутності високих тисків на заготовку), високою точністю і низькою шорсткістю.

Для виготовлення отворів матриць (круглих, шестикутних, профільних) також використовується спосіб електроімпульсного прошивання, який забезпечує потрібну якість та точність обробки. Даний спосіб застосовує для руйнування матеріалу електричну енергію у вигляді нестационарних форм електричних розрядів, зокрема імпульсних. Тому процес обробки супроводжується паузами, які негативно впливають на продуктивність обробки.

За роботами [69 - 71] відомий спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД), в якому енергія підводиться в зону обробки безперервно. Завдяки можливості вводу в зону обробки електричного струму великої потужності забезпечується висока продуктивність. Наприклад, при обробці круглого отвору діаметром 30 мм (площа обробки 706 мм²) в матеріалі сталь 45 при силі струму $I = 1000\text{А}$, продуктивність досягає 27300 мм³/хв при $Ra = 6,3\text{ мкм}$, та глибині зони термічного впливу в межах кількох сотих часток міліметра. Однак, впровадження у виробництво процесу РОД матриць для брикетування стримується відсутністю експериментальних даних про взаємозв'язок технологічних характеристик даного процесу з електричним і гідродинамічним режимами обробки та геометричними параметрами отворів, які обробляються. Проблема ще більше ускладнюється при отриманні отвору з певною шорсткістю поверхні калібрувальної частини матриці. Тому розробка технології, обладнання для отримання матриць для брикетування способом РОД є актуальною.

В Кіровоградському національному технічному університеті проведені дослідження з метою визначення можливості використання

способу РОД для високопродуктивної обробки матриць при використанні їх в обладнанні для гранулювання і брикетування твердих біопалив [68]. В експериментах була вибрана технологічна схема формоутворення за принципом прошивання. Обробку здійснювали з використанням графітового електрода-інструмента (ЕІ, марка МПГ-7) при вибраній технологічній схемі формоутворення з прокачуванням органічного середовища в торцевому міжелектродному зазорі (МЕЗ) під технологічним тиском, за напрямком від периферії до центру електрода-інструмента (рис. 2.13). Предметом дослідження були такі технологічні характеристики: продуктивність обробки M , мм³/хв; питома продуктивність обробки M_a , мм³/А·хв; питома витрата електроенергії a , кВт·год/кг; бічний зовнішній МЕЗ δ , мм; відносний лінійний знос ЕІ γ , %; шорсткість обробленої поверхні Ra , мкм.



а – початкова фаза обробки; **б** – проміжна фаза обробки; **1** – графітовий ЕІ; **2** – сталева заготовка; **3** – електрична дуга; **4** – продукти ерозії; **5** – гідродинамічний потік;

Рисунок 2.13 – Технологічна схема формоутворення та епюри швидкостей потоку в торцевому МЕЗ

Побудова математичних моделей технологічних характеристик процесу РОД сталі Х12МФ (табл. 2.4) здійснювалось з застосуванням математичних методів планування експериментів, зокрема плану 2^{4-1} [72]. На підставі апріорної інформації були відібрані фактори, що визначають режими обробки (сила технологічного струму I , А; статичний тиск робочої

Таблиця 2.4 – Поліноміальні математичні моделі технологічних характеристик процесу РОД зразків із сталі Х12МФ

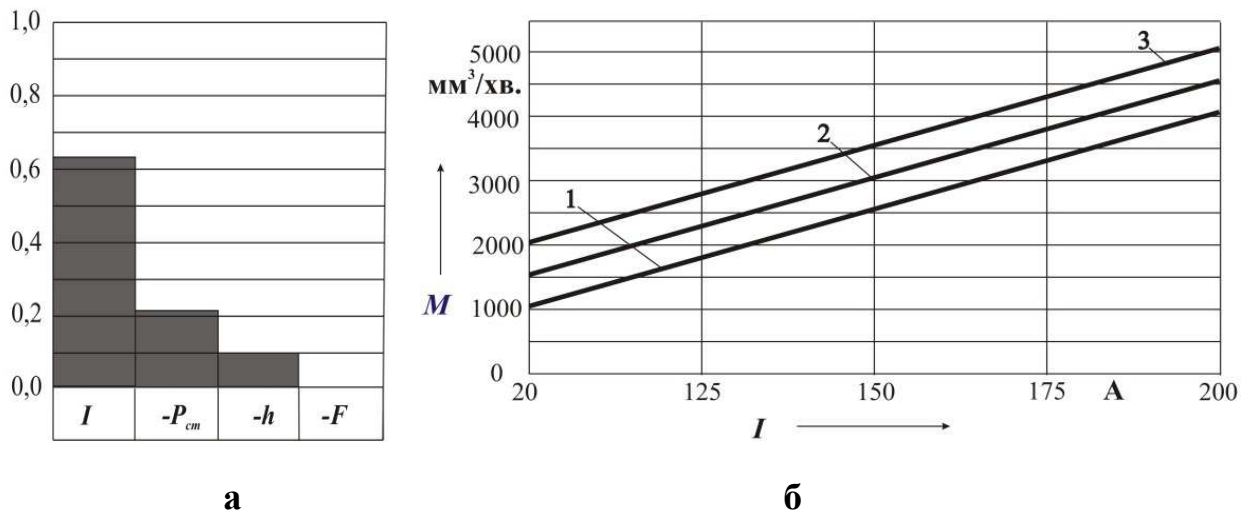
Математична модель	Масштабні співвідношення факторів
Уніполярна РОД бічної поверхні зразка за формулою «графітовий ЕІ – сталь» з використанням способу зворотного прокачування	
$M = 3061 + 1486x_1 - 508x_2 - 390x_4$	$x_1 = (X_1 - 150)/50$ $x_2 = (X_2 - 1)/0,2$ $x_3 = (X_3 - 560)/161$ $x_4 = (X_4 - 3,5)/1,5$
$M_a = 19,249 + 3,468x_1 - 2,72x_2 - 2,481x_4$	
$a = 3,075 - 0,678x_1$	
$R_a = 12,81 + 5,31x_1 - 0,96x_2 + 0,512x_4$	
$\delta_a = 0,0205 - 0,00562x_2$	
$\gamma_{\bar{e}} = 0,967 - 0,34x_2 - 0,208x_4 - 0,085x_1 + 0,023x_3$	
де: $X_1 \rightarrow I, \text{ А}; X_2 \rightarrow P_{cm}, \text{ МПа}; X_3 \rightarrow F, \text{ мм}^2; X_4 \rightarrow h, \text{ мм}$	

рідини на вході в міжелектродний проміжок P_{cm} , МПа) та фактори, що визначають геометричні параметри обробки (площа обробки F , мм²; глибина обробки h , мм).

Всі фактори задовольняли умовам керованості, операційності та однозначності. Інші параметри процесу РОД були зафіксовані на постійному рівні: робоча рідина – органічне середовище; полярність обробки – зворотна; матеріал електрода-інструмента – електроерозійний графіт марки МПГ-7.

В рамках експерименту: продуктивність процесу РОД M сталі Х12МФ змінювалась в межах від 1472 до 3086 мм³/хв.; питома продуктивність обробки M_a – від 12,60 до 30,55 мм³/А·хв; питома витрата електроенергії a – 1,18 до 4,57 кВт·год/кг; бічний зовнішній МЕЗ δ – 0,020 до 0,035мм; відносний лінійний знос ЕІ γ – 0,46 до 1,74 %; шорсткість обробленої поверхні Ra – 6,3 до 20 мкм.

Із аналізу моделі (рис. 2.14) випливає, що на продуктивність обробки M найбільш впливає сила технологічного струму, з підвищенням якої продуктивність збільшується. Отже, силу струму слід визначити головним керуючим фактором, а даний факт свідчить про теплову природу процесу

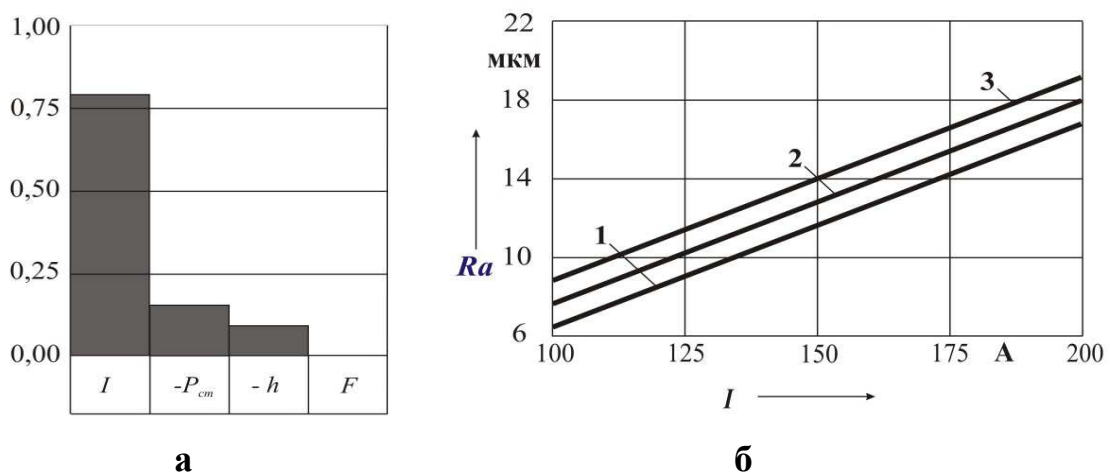


а – ступінь впливу змінних факторів; **б** – залежність M від I та P_{cm} ;
 1 – $P_{cm} = 1,2$ МПа; 2 – $P_{cm} = 1,0$ МПа; 3 – $P_{cm} = 0,8$ МПа

Рисунок 2.14 – Продуктивність чорної РОД бічної поверхні M зразка (формула РОД: “графітовий ЕІ- сталь” з використанням способу зворотного прокачування)

РОД. Вплив площі обробки F на продуктивність значно менший, а статичний тиск P_{cm} , та глибина обробки суттєвого впливу не створювало.

Із моделі та рисунку 2.15 можна зробити висновок, що шорсткість обробленої поверхні Ra в повній мірі визначається силою технологічного струму I (ступінь впливу – 78,3 %) та залежить від статичного тиску P_{cm} , та глибини обробки h . Із підвищенням I шорсткість поверхні підвищується.



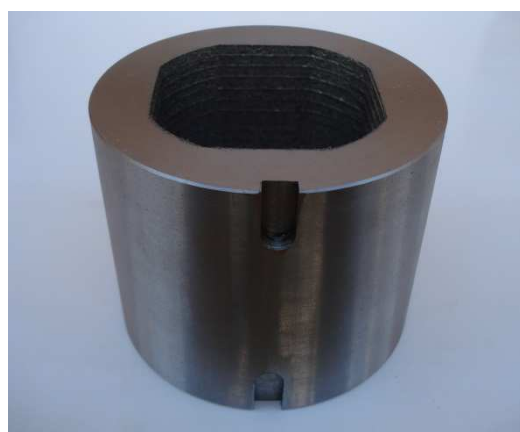
а – ступінь впливу змінних факторів; **б** – залежність Ra від I та P_{cm}
 1 – $P_{cm} = 1,2$ МПа; 2 – $P_{cm} = 1,0$ МПа; 3 – $P_{cm} = 0,8$ МПа

Рисунок 2.15 – Шорсткість обробленої поверхні Ra РОД бічної поверхні зразка (формула РОД: “графітовий ЕІ- сталь” з використанням способу зворотного прокачування)

Отже, сила технологічного струму I по відношенні до шорсткості обробленої поверхні Ra є головний керуючий фактор. Причому, чим менша сила технологічного струму, тим більша ймовірність утворення лунок. При виконаних експериментальних дослідженнях шорсткість вимірювалася на периферійній частині торцевої поверхні зразка. В умовах експерименту вона змінювалася у межах від Ra – 6,3 до 20 мкм. За результатами металографічних досліджень мікротріщин у поверхневому шару зразка після РОД не виявлено. Обробку бічної поверхні, а саме фасонної циліндричної калібруючої напрямної (рис 2.16) здійснювали графітовим ЕІ марки МПГ-7 при наступному режимі обробки: сила технологічного струму $I = 100$ А, напруга на дузі $U = 27$ В, статичний тиск органічної робочої рідини на вході потоку в міжелектродний зазор $P_{ст} = 1,2$ МПа, площа обробки $F = 721$ мм², полярність обробки зворотна (заготовка «плюс»), спосіб прокачування рідини крізь торцевий міжелектродний зазор – зворотній (від периферії до центра отвору заготовки). В результаті обробки матриці для брикетування з сталі Х12МФ, була зафіксована продуктивність обробки $M = 1520$ мм³/хв., що в 4,1...5,2 разів перевищує продуктивність електроімпульсної обробки.



а



б

а – обробка матриці на електроерозійному верстаті моделі "Дуга-8Г"; б – матриця для брикетування після РОД фасонного калібруючого отвору графітовим ЕІ ($I = 100$ А, $P_{ст} = 1,2$ МПа, $F = 721$ мм², $h = 78$ мм)

Рисунок 2.16 – Випробування способу РОД матриць для брикетування

Наведені результати досліджень дозволяють рекомендувати спосіб РОД для обробки матриць пресового обладнання, що застосовується у виробництві твердого біопалива з рослинних відходів.

Розділ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ РОСЛИННИХ ВІДХОДІВ

3.1. Особливості процесу пелетоутворення у відкрити та закрити матриці

З фізичної точки зору матеріал з сипких рослинних відходів являє собою дисперсну двофазна систему тверде тіло-газ, яка характеризується певним співвідношення фаз. Кількісно це співвідношення визначається коефіцієнтом густини укладання часточок K , який є основним параметром сипкого матеріалу і дорівнює [73]:

$$K = V_m / V = \rho / \gamma_0,$$

де V_m – об'єм твердої фази, м^3 ; V – об'єм сипкого матеріалу, м^3 , ρ – густина твердої фази, $\text{кг}/\text{м}^3$; γ_0 – об'ємна густина сипкого матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Коефіцієнт густини укладання часточок сипкого матеріалу – величина нестала і змінюється залежно від умов формування сипкого матеріалу в порожнині корпусу, умов його руху в потоці, умов на межі потоку тощо. Збільшення коефіцієнта густини укладання характеризується поступовою втратою часточками сипкого матеріалу здатності до відновлення переміщення. Втративши здатність до переміщення, сипкий матеріал перетворюється в суцільну структуру і набуває властивостей твердого тіла.

На процес такого перетворення впливають розміри порожнини матриці, в яку надходить сировина. За $H/B \leq 1$ (висота шару/діаметр порожнини корпусу) властивості сипкого матеріалу виявляються чіткіше, його поведінка наближена до поведінки рідини.

У разі насипання біосировини в глибоку порожнину корпусу з $H/B > 1$ (рис. 3.1) ступінь перетворення її у суцільну структуру зростає з

підвищенням коефіцієнта густини укладання. При цьому сипкий матеріал, втрачаючи рухливість, набуває властивості твердого тіла, що приводить до здатності шарів сировини передавати горизонтальний тиск під дією вертикальних навантажень (розпір) [73]. Для варіанту конструкції, наведеної на рисунку 3.1, такий стан характерний в нижній частині корпусу і конусній частині відкритої матриці.

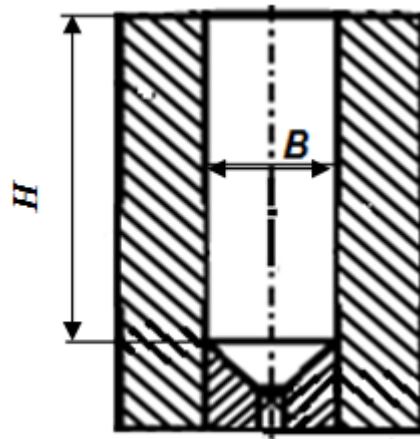


Рисунок 3.1 – Форма порожнини відкритої матриці

Стиснення матеріалу у відкритій матриці пресового пристрою характеризується переміщенням частинок матеріалу переважно у напрямку руху пуансона, а переміщення в сторони стінок матриці незначне. При цьому процес стикування супроводжується динамічним тертям: зовнішнім – внаслідок ковзання матеріалу відносно внутрішньої поверхні корпусу та конусної поверхні матриці, що з ним контактує, та внутрішнім – внаслідок ковзання одних частинок матеріалу відносно інших.

За наявності внутрішнього тертя в процес втягується шар матеріалу і поверхня зсуву, як така, відсутня. У разі зовнішнього тертя, яке виникає внаслідок відносного зміщення сировини по стінках корпусу, тертя зумовлене процесами в пристінному шарі.

Внутрішнє тертя має складний комплексний характер. Виникнувши в шарі матеріалу, тертя визначається площами фактичних контактів, їх числом, яке залежить від густини укладання, пружними властивостями

часточок твердої фази, розмірами і формою часточок, станом їхньої поверхні та іншими факторами.

Величина коефіцієнта внутрішнього тертя f змінюється від певного мінімального значення, якому відповідає найбільша рухомість часточок матеріалу, до максимального значення, що відповідає перетворенню матеріалу, за якого рухомість часточок прямує до нуля, тобто

$$f_{min} < f < f_{max}.$$

Максимальне значення коефіцієнта внутрішнього тертя визначається максимальним значенням коефіцієнта густини укладання, за якого сипка біосировина перетворюється в суцільну структуру. При цьому процес тертя в площині зсуву замінюється на процес в площині зрізу твердої фази.

Густина укладання рослинних відходів, які стискаються в корпусі пресового пристрою, змінюється з висотою шару. Відповідно до цього змінюється і коефіцієнт внутрішнього тертя.

Зовнішнє тертя характеризує процес зсуву сировини по поверхні, що його обмежує. Процес зсуву – явище комплексне і наближено його можна описати рівнянням Амонтона [74]:

$$F_{max} = fN = N \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

де f – коефіцієнт тертя; N – сила нормального тиску; φ – кут тертя.

Величина коефіцієнта тертя є не сталою і залежить, в основному, від нормального тиску сировини на обмежувальну поверхню. Це пояснюється тим, що в процесі зсуву матеріалу в зонах, які прилягають до обмежувальної поверхні, відбувається пошарова передача енергії пружних деформацій і кількості руху від зовнішніх шарів до внутрішніх.

За незначних зсувних зусиль, нездатних подолати сили опору на контактах часточок, матеріал зміщується по обмежувальній поверхні в площині контактів часточок матеріалу з поверхнею.

При збільшенні зсувних зусиль настає момент, коли часточки рослинних відходів, які лежать у пристінному шарі внаслідок перетворення набувають властивостей твердого тіла, з подальшим охопленням глибших шарів.

На просування біоматеріалу вздовж філь'єри матриці також впливає початковий опір зсуву (статичне тертя), значення якого більше динамічного тертя. Початковий опір зсуву навіть в одного і того ж сипкого біоматеріалу є різним в залежності від його ущільнення і вологості [74].

Механізм передачі зусиль у матеріалі, який переміщується в корпусі пресового пристрою, аналогічний механізму передачі зусиль у склепіннях, для яких горизонтальна складова тиску сипкого матеріалу стала по горизонтальному перерізу потоку і аналогічна силі розпору, а вертикальна складова аналогічна підтримувальній силі.

Засипаний у корпус пресового пристрою матеріал під дією руху пуансона намагається переміщуватись з конусної частини матриці до циліндричної. Відносно зміщення між часточками, що виникає при цьому, перерозподіляє зусилля в контакті між ними, у зв'язку з чим на виході з конусної частини матриці створюються умови виникнення склепінчастої структури сипкого матеріалу [73]. Залежно від діаметра циліндричної частини матриці (діаметра пелет) ця структура може набувати форми стійкого склепіння, перекривати випускний отвір і припинити рух матеріалу.

Експериментальними дослідженнями доведено, що в зоні переходу біоматеріалу від конусної ділянки до циліндричної, його гальмування обумовлено розподілом кінематичних та силових параметрів у процесі пресування. В цій зоні зростає гідростатичний тиск, підвищуються радіальні напруження в біоматеріалі та зменшуються осьові переміщення. При цьому напруження, які виникають в металі матриці в зоні переходу від конусної ділянки до циліндричної, досягають значень, що можуть значно перевищувати межу його міцності [75].

Потрібно відмітити, що рослинні відходи та композити на їх основі мають властивості, які не дозволяють їх віднести ні до цілком пластичних чи пружних матеріалів [73]. Важливий вплив на процес пелетоутворення має величина вологості біоматеріалу, оскільки більший вологоміст сприяє підвищенню пластичності та зменшенню пружності матеріалу і навпаки. Але пелети, отримані з матеріалів надто високої вологості, при висиханні можуть мати незадовільну якість.

3.2. Математична модель процесу пелетоутворення з використанням матриць

Математична модель процесу пелетоутворення для плоскої матриці з циліндричним каналом. Для опису процесу гранулювання дрібнодисперсної деревинної сировини користуються математичною моделлю пресування металевих порошків у фільсах матриць [76- 78].

Розрахункову схему по визначенню сили проштовхування для утворення гранули за такою моделлю приведено на рис. 3.2 [79]. До сировини прикладається тиск пресування $p_{\text{пр}}$, щоб рухати її з постійною швидкістю через філь'єру діаметром D і довжиною L .

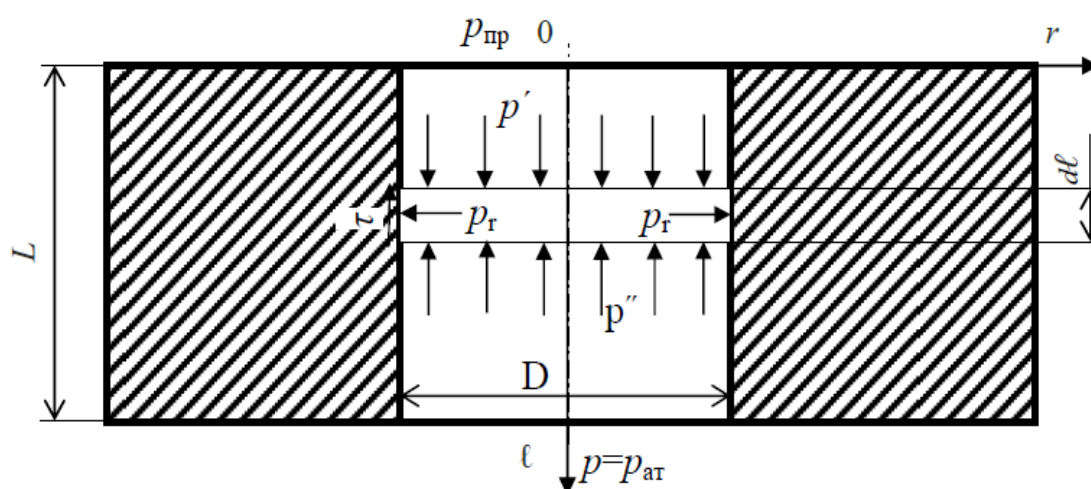


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема по визначенню сили проштовхування для утворення гранули

Для того, щоб сировина рухалась з постійною швидкістю, необхідно, щоб сума всіх діючих на неї сил дорівнювала нулю: $\sum F_i = 0$.

Оскільки отвір матриці являє собою циліндр, використовується циліндрична система координат. В цьому випадку зміна параметрів сировини вздовж осі θ в силу симетрії буде дорівнювати нулю, тобто $\partial/\partial\theta = 0$. Вздовж осі циліндру розташована вісь ℓ і нормальна до неї вісь r .

На верхню торцеву поверхню нескінченно малого циліндричного елемента сировини діаметром D і завтовшки $d\ell$ діє тиск p' , а на нижню торцеву поверхню $-p''$. На бокову циліндричну поверхню виділеного елемента діє дотична напруга тертя τ і нормальний тиск p_r . Умова рівноваги виділеного елемента записується у вигляді:

$$(\pi D^2(p' - p'')/4) - \pi D \tau d\ell = 0. \quad (3.1)$$

Після перетворень рівняння має вид:

$$-dp = 4\tau d\ell / D. \quad (3.2)$$

У першому наближенні прийнято, що місцеві дотичні напруження τ прямо пропорційні місцевому нормальному тиску p_r :

$$\tau = k p_r. \quad (3.3)$$

де k - коефіцієнт, що враховує фізичні характеристики матеріалу поверхонь тертя філь'єри і сировини.

При надходженні початкової сировини до філь'єри матриці під дією сили тиску пресувального ролика відбувається її ущільнення і пластична деформація ущільненої маси в циліндр, тобто формування циліндричної форми гранули закінчується на вході до філь'єри. В цьому випадку тиск, що створює ролик на вході до філь'єри буде максимальним, який потім знижується з просуванням ущільненої маси вздовж філь'єри. Оскільки осьовий тиск по довжині філь'єри знижується, тому додаткових пластичних деформацій не відбувається, а сам матеріал при просуванні по

філь'ері буде знаходитись у пружно-напруженому стані. Вибір за розрахункову модель циліндричного елементу гранули діаметром D і нескінченно малої довжини $d\ell$ призводить до того, що перепад тиску по довжині цього елементу як і пружні деформації будуть малими, внаслідок чого пружний стан цього елементу буде підпорядковуватися закону Гука.

З вище зазначених умов, радіальний тиск p_r може бути визначено через осьовий тиск p за залежністю [79]:

$$p_r = \nu p, \quad (3.4)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона.

З урахуванням (3.3) та (3.4) вираз (3.2) приймає вид:

$$dp = -4k\nu p d\ell / D. \quad (3.5)$$

Після розділу змінних і інтегрування (3.5) приймає вид [79]:

$$p = C \cdot \exp(-4k\nu\ell / D), \quad (3.6)$$

де C – константа інтегрування.

Для визначення константи інтегрування C вибрана гранична умова: при $\ell = L$ тиск на торцеву поверхню $p = p_{am}$.

Після підстановки граничних умов в рівняння (3.6) одержуємо:

$$C = p_{am} \exp(4k\nu L / D). \quad (3.7)$$

Рівняння розподілу тиску по довжині гранули у філь'ері матриці приймає вид [79]:

$$p = p_{am} \exp(4k\nu(L - \ell) / D), \quad (3.8)$$

тобто розподіл тиску у гранулі по довжині каналу матриці носить експоненціальний характер (рис. 3.3).

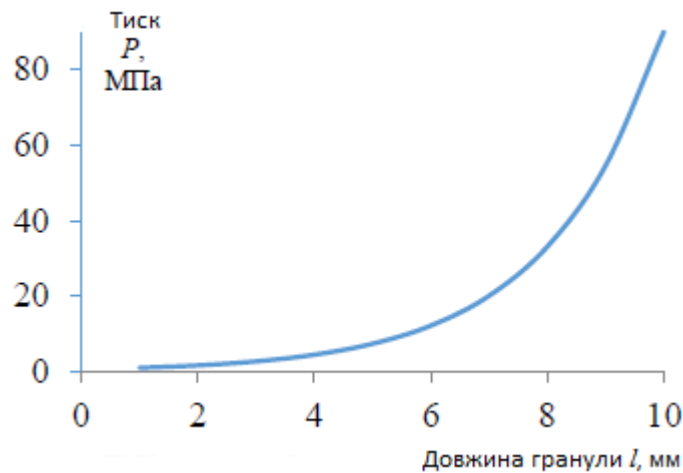


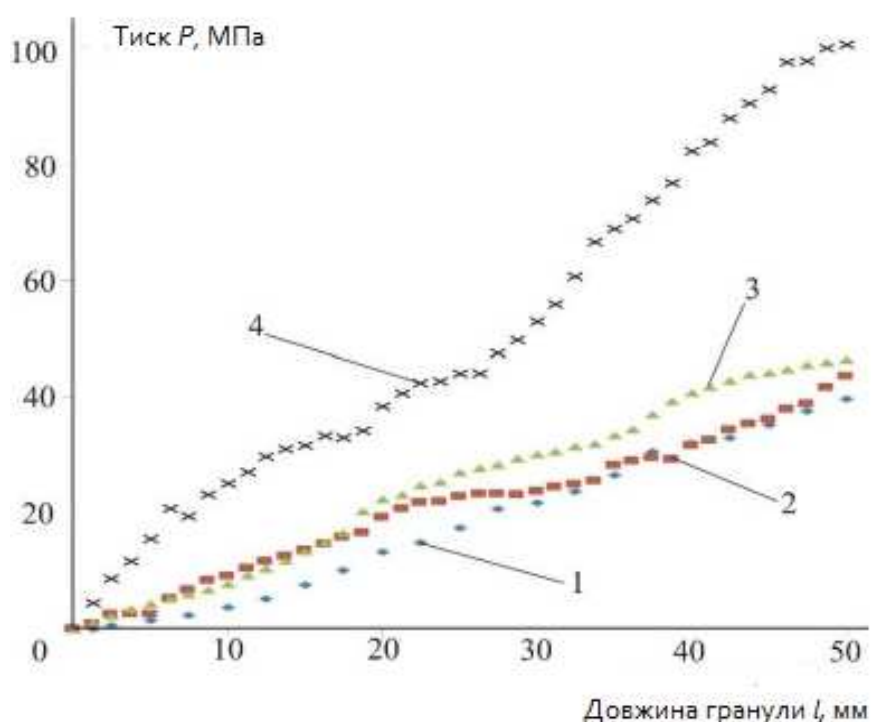
Рисунок 3.3 – Теоретична залежність тиску проштовхування від довжини гранули

При $\ell=0$, вираз для визначення величини тиску для проштовхування спресованої гранули матиме такий вигляд [79]:

$$p_{\text{пр}} = p_{\text{ат}} \cdot \exp(4k\nu L / D). \quad (3.9)$$

Для перевірки відповідності одержаної математичної моделі дійсним фізичним процесам в пресі було виконано низку експериментальних досліджень по визначенню тиску проштовхування спресованого матеріалу з деревини діаметром 8 мм з поодинокі філь'єри матриці довжиною 50 мм [80]. На рисунку 3.4 надані результати експериментальних досліджень для гранули з соснової тирси різного вологовмісту початкової сировини і фракційним складом до 1 мм.

З рисунка 3.4 видно, що залежність тиску проштовхування від довжини спресованої гранули $p = f(\ell)$ носить квазілінійний характер, що явно протирічить залежності (3.9). Оскільки структурно-механічні характеристики біосировини з різних рослинних відходів близькі між собою [40], з великою ймовірністю можна припустити, що аналогічна залежність буде і для рослинних відходів сільського господарства.



1 – 6,1%; 2 – 10,9%; 3 - 15%; 4 - 20%

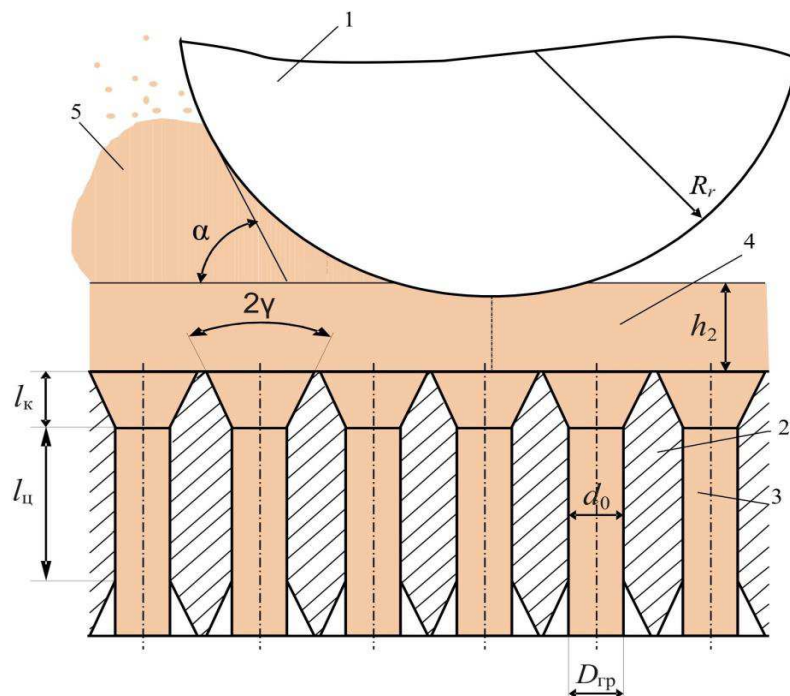
Рисунок 3.4 – Зміна тиску прошовування гранули в залежності від її довжини і вологовмісту дрібнодисперсної деревинної сировини

Аналіз залежності (3.7) показує, що величина тиску виштовхування гранули дуже залежить від протитиску на виході з філь'єри. Це справедливо при пресуванні пелет з порошкових матеріалів в замкнених (закритих) каналах або філь'єрах. В прес-грануляторі вихідний отвір каналу матриці має вільний вихід в атмосферу і тому тиск дорівнює атмосферному. Якщо умовно помістити його у газощільну камеру і почати здійснювати розрідження, то постійна інтегрування C , згідно рівнянню (3.7), почне знижуватись і прагнути до нуля. В цьому випадку згідно рівнянню (3.9) тиск пресування також буде прагнути до нуля, тобто $p_{\text{пр}} \rightarrow 0$, що протирічить фізиці процесу гранулювання.

На підставі викладеного вище можна стверджувати, що математична модель процесу пресування пелет [76-78], яка використовується в теперішній час, не відбиває реальної фізики процесу гранулювання.

Математична модель процесу пелетоутворення у плоскій матриці з комбінованим каналом. Розглядаючи процес пелетоутворення з використанням притискувального ролика і плоскої матриці (рис. 3.5 [79]), профілі фільтер яких складаються з конусної вхідної частини, циліндричної (калібрувальної) і вихідної зі зворотним конусом, формоутворення окремої гранули можна розділити на чотири послідовні етапи:

- 1 етап: вирізання частини сировини із спресованого шару;
- 2 етап: виштовхування вирізаної маси через конічний отвір до циліндричного каналу матриці;
- 3 етап: проштовхування сформованої гранули через циліндричний канал матриці;
- 4 етап: вихід гранули з фільт'єри матриці.



1 – пресувальний ролик; 2 – матриця; 3 – спресована гранула;
4 – спресований шар сировини; 5 – насипний шар сировини

Рисунок 3.5 – Розрахункова схема процесу пресування пелет

На виході з циліндричного каналу матриці спресована гранула знаходиться під атмосферним тиском, який можна не враховувати при

визначенні тиску пресування. В цьому випадку тиск пресування p_{np} , що розвивається пресувальним роликом, складається з перепадів тиску в спресованому шарі $\Delta p_{виз}$, тиску в конічній частині матриці Δp_d , та тиску на циліндричній гранулі Δp_u , який можна визначити за залежністю [79]:

$$P_{np} = \sigma_{\tau} \frac{4h_{np}}{d_0 + 2l_k \operatorname{tg} \gamma} + 2 \left(1 + \frac{\mu_{mp} \nu}{2(1 - \cos \gamma) + \sin^2 \gamma} \right) \sigma_{\tau} \ln \frac{D}{d_0} +$$

$$+ 4 \frac{\mu_{mp} l_u}{d_0} \frac{E}{(1 + \nu)} \frac{(D_{ep} - d_0) \left(\frac{D_{ep}^2}{d_0^2} - 1 \right)}{d_0 \left(1 - 2\nu + \frac{D_{ep}^2}{d_0^2} \right)}. \quad (3.9)$$

де σ_{τ} - напруга текучості; h_{np} - висота спресованого шару; d_0 - діаметр філ'єри; D - діаметр вхідного конусу; D_{ep} - діаметр гранули після виходу з філ'єри; μ_{mp} - коефіцієнтом тертя спресованої сировини по стінках філ'єри матриці; E - модуль Юнга

Залежність показує, що тиск, який створює притискувальний ролик для проштовхування спресованої гранули через фільтру матриці має лінійний характер. Одночасно на тиск пресування впливають такі параметри спресованої сировини як модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона і коефіцієнт тертя гранули по циліндричній стінці матриці. Одержане рівняння зв'язує тиск пресування гранул з основними конструктивними характеристиками пресового обладнання і фізичними характеристиками сировини.

Проведений математичний аналіз показав, що для повного виконання розрахунків по технологічному процесу пресування пелет необхідно мати дані по таким фізичним характеристикам початкової сировини і спресованих гранул, як кут природного ухилу і ущільненість сировини, модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона для спресованої сировини, впливу на них початкової вологості і фракційного складу.

Розглянемо в якості прикладу визначення тиску пресування за наведеним вище виразом для тиску з прийнятою границею текучості

$\sigma_{\tau} = 2 \text{ МПа}$ (напруга, при якій деформації продовжують зростати без підвищення навантаження). Вище цього значення в матеріалі, що пресується, починають відбуватись незворотні зміни, при яких спостерігаються значні пластичні деформації.

Матриця, в якій здійснюється процес пресування має наступні геометричні характеристики: діаметр на вході в конічну ділянку філ'єри $D = 9,5 \text{ мм}$; діаметр циліндричної частини каналу $d_0 = 8 \text{ мм}$; довжина конічної $\ell_k = 2 \text{ мм}$, довжина циліндричної $\ell_y = 38 \text{ мм}$; кут при вершині конічної частини $2\gamma = 40^\circ$. Коефіцієнт тертя сировини по стінці матриці приймаємо $\mu_{mp} = 0,6$; коефіцієнт Пуассона ν і модуль Юнга E знаходимо за графіками на рис. 35 і 36 [79].

Приймаємо висоту шару, що пресується $h_{np} = 5 \text{ мм}$. Діаметр гранули D_{gp} визначався експериментально ручним вимірювальним інструментом і складав $8,4 \text{ мм}$ [79].

Розраховане за виразом 3.9 значення тиску пресування складало:

$$p_{np} = 23,12 \text{ МПа}$$

Якщо прийняти до уваги результати експериментальних досліджень, наведених в роботі [49], то для розглянутого прикладу отримані пелети будуть мати густину біля $1,1 \text{ г/см}^3$.

Математична модель процесу пелетоутворення у циліндричній матриці. В роботах [81, 82] показані принципи побудови математичної моделі процесу пресування дисперсних матеріалів в циліндричних пресах-грануляторах. Подальшими дослідженнями здійснено її вдосконалення [83], спрямоване на можливість врахування максимальної кількості конструктивно-технологічних параметрів. Цими авторами розроблена інформаційна технологія проектування (ІТП) обладнання для обробки дисперсних матеріалів екструзією та запропоновано її використання при створенні вузла пресування гранулятора в технології пелетування

рослинних відходів при виробництві біопалива. ІТП типу "математична модель – інтелектуальна експертна система – система автоматизованого проектування" [84], розглядає технологічний процес грануляції у вигляді багатокомпонентної системи взаємозв'язаних об'єктів досліджень: сировинної маси, елементів технологічного обладнання, механічного навантаження тощо.

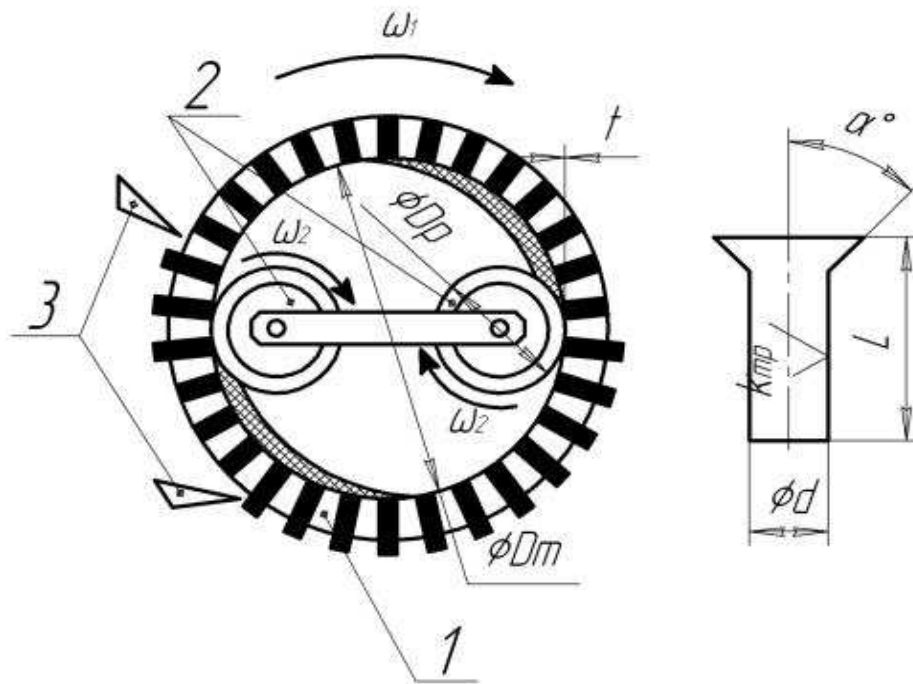
Аналітична структура математичної моделі включає побудову залежності між конструктивно-технологічними параметрами вузла пресування шляхом застосування регресійного аналізу досліджуваних функцій та задачі пошуку оптимального розподілу цих параметрів. Ефективність роботи преса-гранулятора оцінювалось по густині ρ пелет, а також продуктивності Q преса-гранулятора і потужності W його привода.

В перелік алгоритмічної структури математичної моделі входили алгоритми, що реалізують метод рівнянь регресії та розв'язання задачі оптимізації, засновані на LMA (Levenberg–Marquardt algorithm).

У межах розробленої ІТП розглянуто моделювання процесу гранулювання біопаливних пелет екструзією [86] на пресі-грануляторі з розташуванням пресувальних роликів всередині циліндричної матриці (рис. 1.21б)

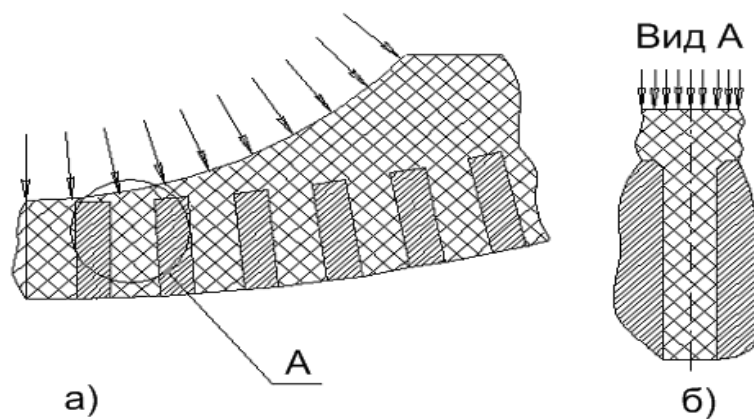
Для прийнятої конструктивної схеми гранулятора виділялись наступні основні параметри, що впливають на протікання процесу: геометричні розміри роликів і матриці, геометричні розміри отворів у матриці, шорсткість поверхні отворів, частота обертання матриці гранулятора, тиск при екструзії крізь отвір, реологічні властивості сировини, продуктивність і якість готової продукції.

На рисунку 3.6 представлена схема роботи вузла пресування біосировини, а на рисунку 3.7 – відповідні розрахункові схеми процесу гранулювання екструзією. Перша розрахункова схема (рис. 3.7, а) враховує геометрію як матриці гранулятора, (її діаметр, та відстань між



1 – циліндрична матриця с отворами; 2 – пресувальний ролик; 3 – ніж;
 ω_1 , ω_2 – кутова швидкість обертання матриці та ролика відповідно; D_p та D_m –
 діаметр матриці та ролика; t – зазор між роликом та матрицею; L – довжина
 отвору в матриці; d – діаметр отвору в матриці; α – кут нахилу фаски отвору

Рисунок 3.6 – Схема роботи вузла пресування



а – нагнітання матеріалу роликом до отворів матриці; б – екструзія матеріалу
 через отвір матриці

Рисунок 3.7 - Розрахункові схеми процесу гранулювання

отворами), так і діаметр пресувального ролика і відстань між матрицею
 гранулятора та роликом.

Друга розрахункова схема (рис. 3.7,б) призначена для моделювання процесу екструзії матеріалу в каналі матриці гранулятора.

Використання першої розрахункової схеми (рис. 3.7,а) дозволяє дослідити особливості поведінки матеріалу у прошарку між роликом та матрицею. Аналіз результатів обчислювальних експериментів, що проведені на основі цієї розрахункової схеми, дозволили визначити отвори матриці, в яких відбувається найбільш інтенсивне пресування матеріалу.

Моделювання руху дисперсного матеріалу крізь отвори, де відбувається найінтенсивніше пресування біосировини, проводили з використанням другої розрахункової схеми (рис. 3.7б). При цьому результати попередніх розрахунків використані як початкові умови навантаження на матеріал у відповідному отворі.

Оброблення результатів обчислювальних експериментів дозволило отримати аналітичні співвідношення між конструктивно-технологічними параметрами вузла пресування гранулятора. Для лушпиння соняшника співвідношення мають наступний вид [31]:

$$\left\{ \begin{array}{l} P = 58,04 + 9,8d + 15,72L + 4,25P - 0,049d \cdot P - 0,53d^2 - 0,09L^2 - 0,0065P^2 \rightarrow \max; \\ Q = 1745,5 + 35,8d + 18,2L + 10,9P + 0,13d \cdot P - 0,04L \cdot P - 0,3L^2 - 0,02P^2 \rightarrow \max; \\ W = 126,1 - 3,39d + 1,29L + 0,76P - 0,0013P^2 \rightarrow \min; \\ 40 \leq L \leq 90; \\ 8 \leq d \leq 28; \\ 50 \leq P \leq 300. \end{array} \right.$$

Аналогічні співвідношення отримано для соломи, лушпиння гречки та стружки сосни і дубу. Використання отриманих залежностей дозволяє конкретизувати та розв'язувати задачу оптимізації.

Аналіз та обробка результатів проведеного комплексу обчислювальних експериментів дозволив побудувати графічні залежності густини пелет та продуктивності гранулятора від основних конструктивно-

технологічних параметрів вузла пресування гранулятора (рис. 3.8-3.11) [83].

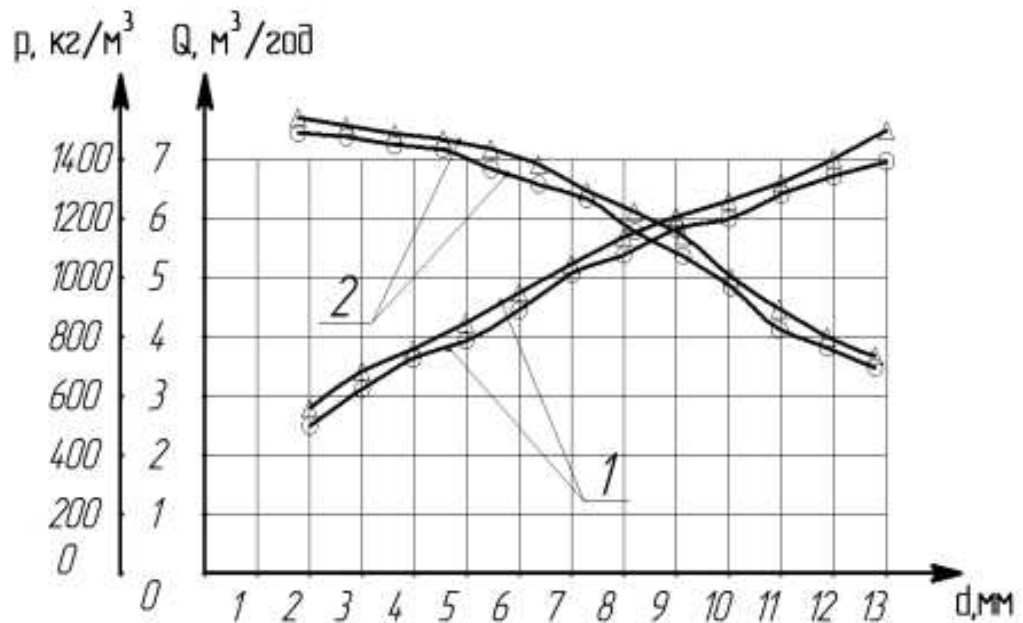


Рисунок 3.8 – Графіки залежності продуктивності (1) та густини (2) від діаметра каналу d для деревної стружки (▲) та лушпиння соняшника (●)

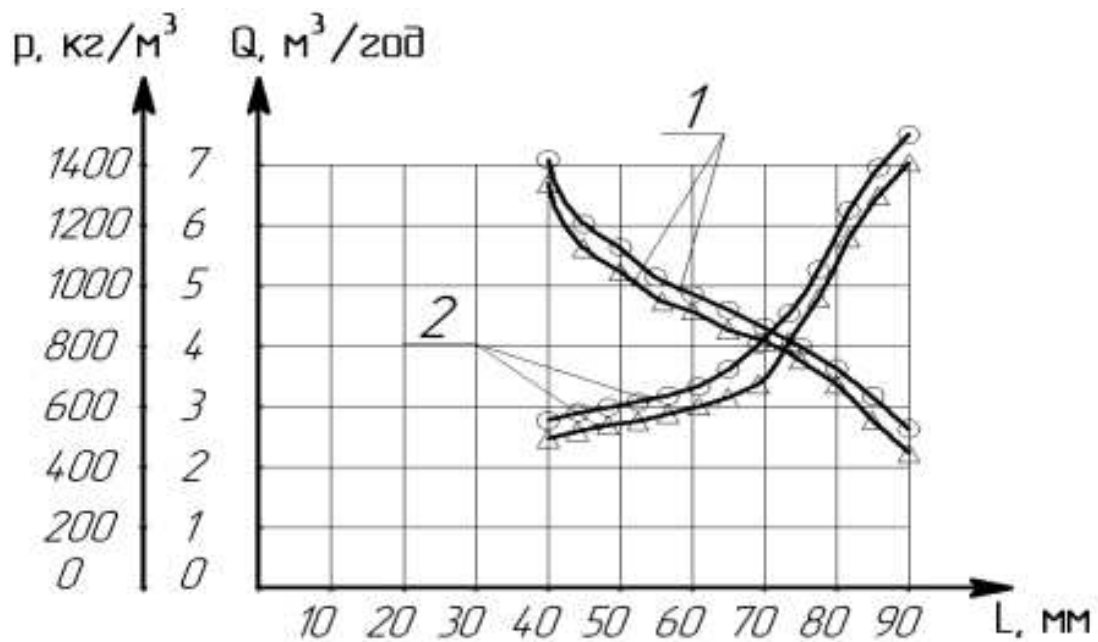


Рисунок 3.9 – Графіки залежності продуктивності (1) та густини (2) від довжини каналу L для деревної стружки (▲) та лушпиння соняшника (●)

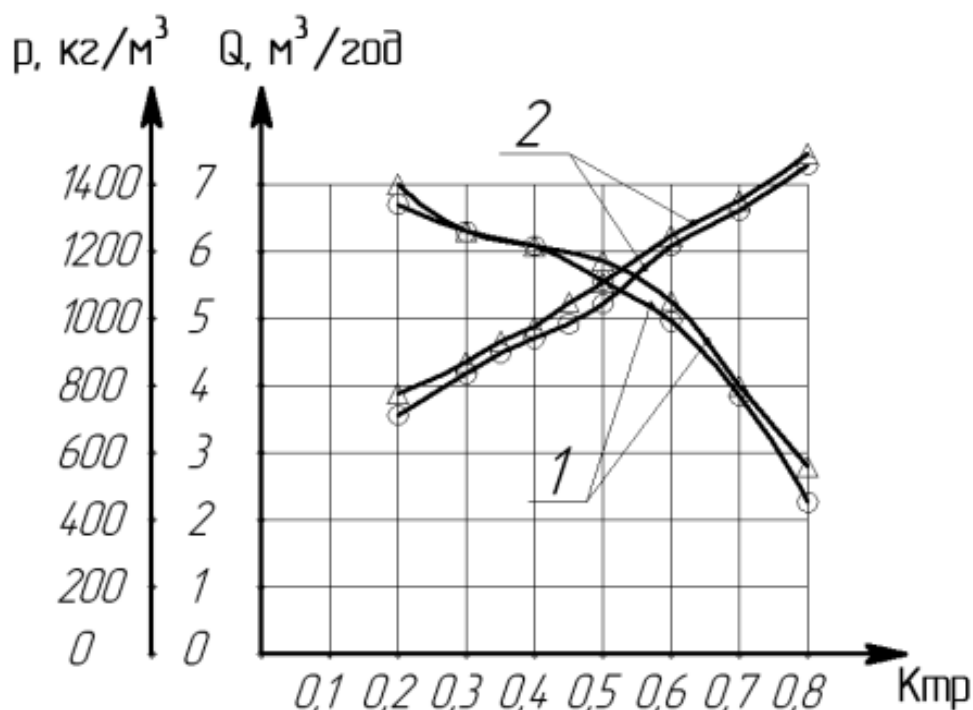


Рисунок 3.10 – Графіки залежності продуктивності (1) та густини (2) від коефіцієнта тертя між сировиною та поверхнею каналу для деревної стружки (▲) та лущиння соняшника (●)

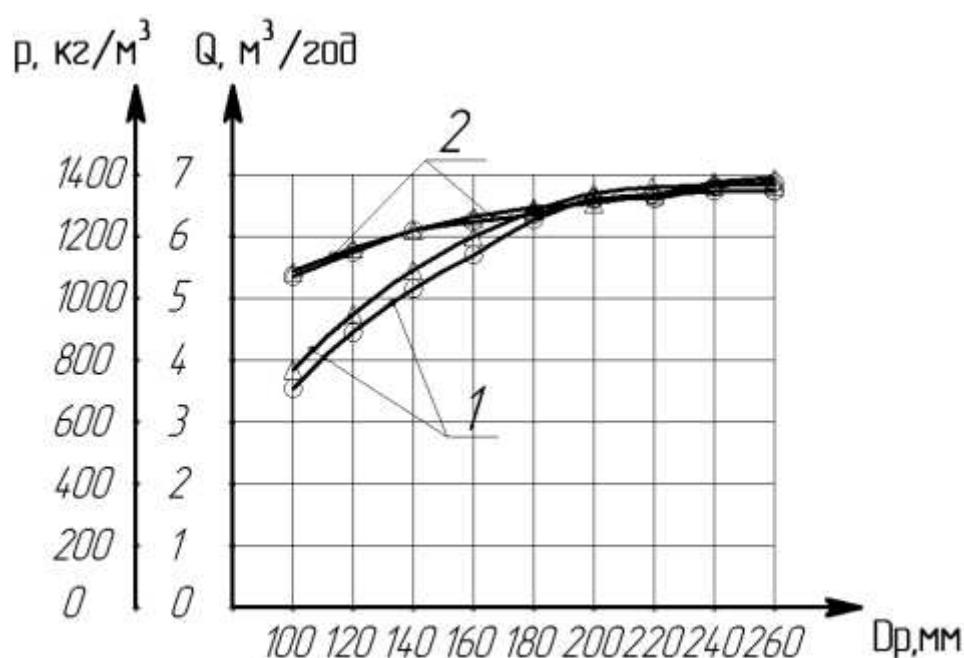


Рисунок 3.11 – Графіки залежності продуктивності (1) та густини (2) від діаметра ролика D для деревної стружки (▲) та лущиння соняшника (●)

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі було проведено комплекс дослідів по аналізу закономірностей пресування дисперсних матеріалів. Аналіз отриманих результатів показав, що

розбіжність теоретичних результатів з даними експериментів оцінюється межею 29 %.

Розроблена математична модель [83] дає можливість визначити взаємозв'язок між основними конструктивно-технологічними параметрами прес-гранулятора з урахуванням структурно-механічних характеристик сировини. Отримані результати доцільно використати в якості рекомендацій при проектуванні пресового обладнання з циліндричною матрицею.

В роботі [31] згідно розрахункових схем (рис. 3.7), проведено комплекс обчислювальних експериментів по дослідженню зміни густини пелет в залежності від конструктивних параметрів вузла пресування гранулятора ГТ-420, 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 тощо.

Графічні залежності густини пелет від основних конструктивно-технологічних параметрів пресового обладнання при різних тисках пресування лущиння соняшника наведено на рисунках 3.12 – 3.17.

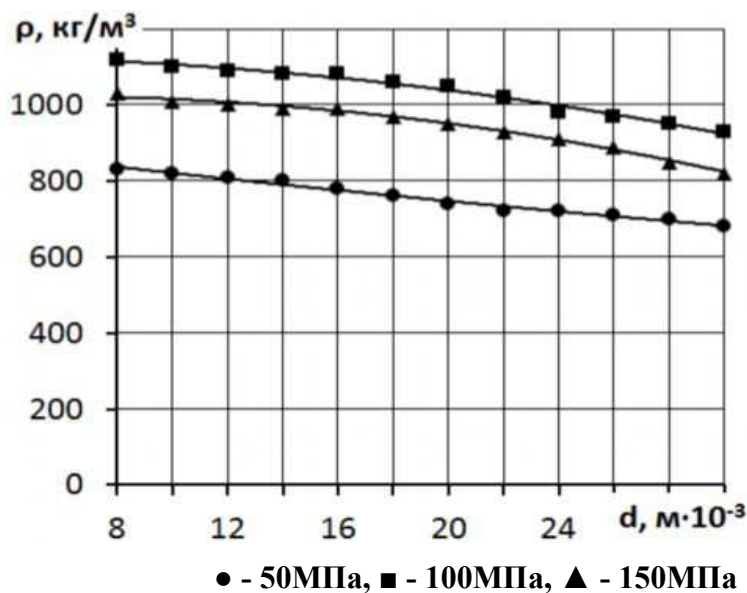


Рисунок 3.12 – Залежність густини гранули ρ від діаметра d філь'єри матриці

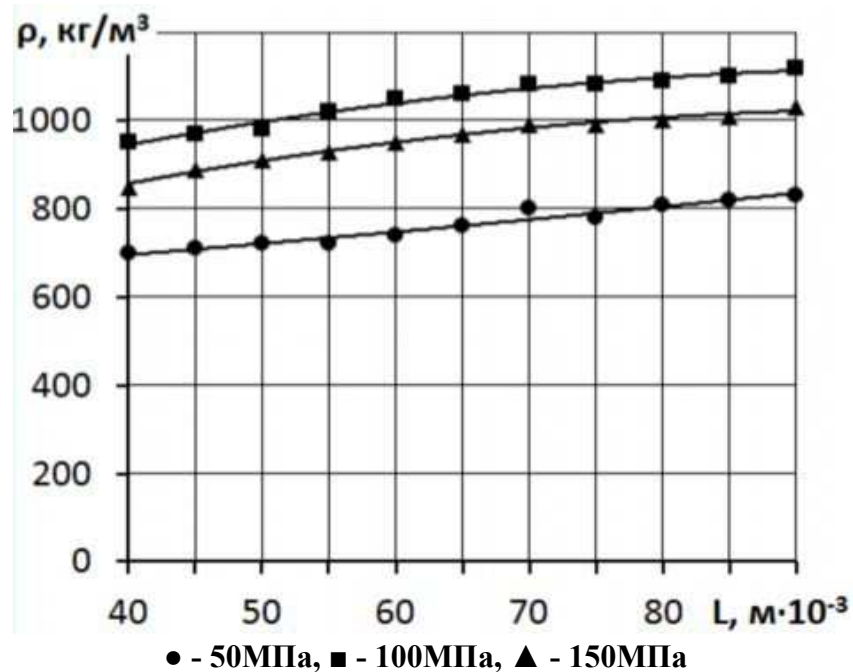


Рисунок 3.13 – Залежність густини пелет ρ від довжини L отвору матриці

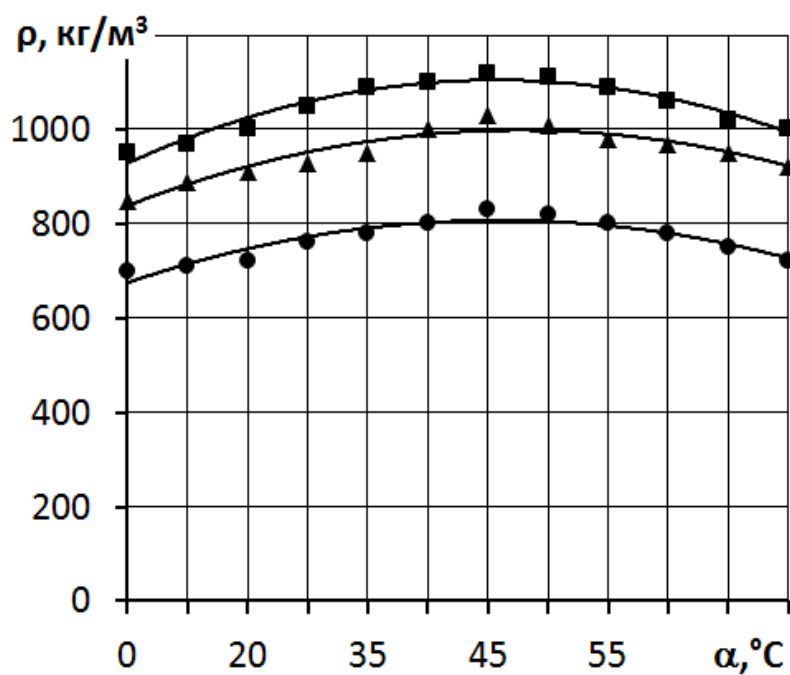


Рисунок 3.14 – Залежність густини пелет ρ від кута отвору α матриці

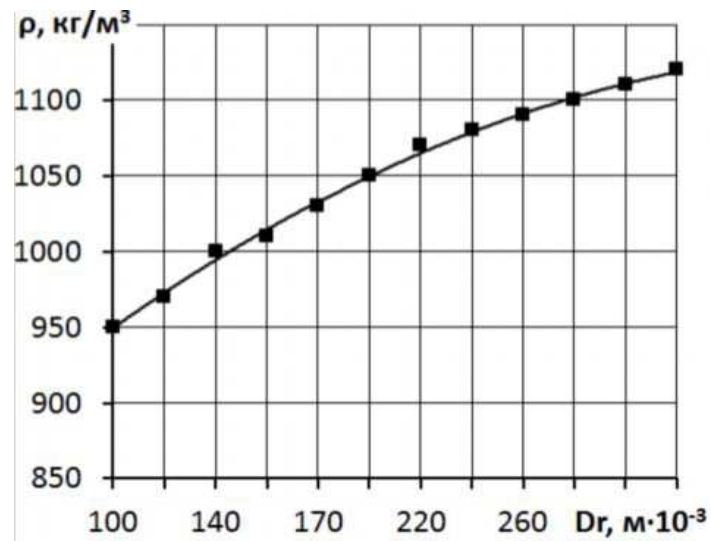


Рисунок 3.15 – Залежність густини пелет ρ від діаметра D_r ролика

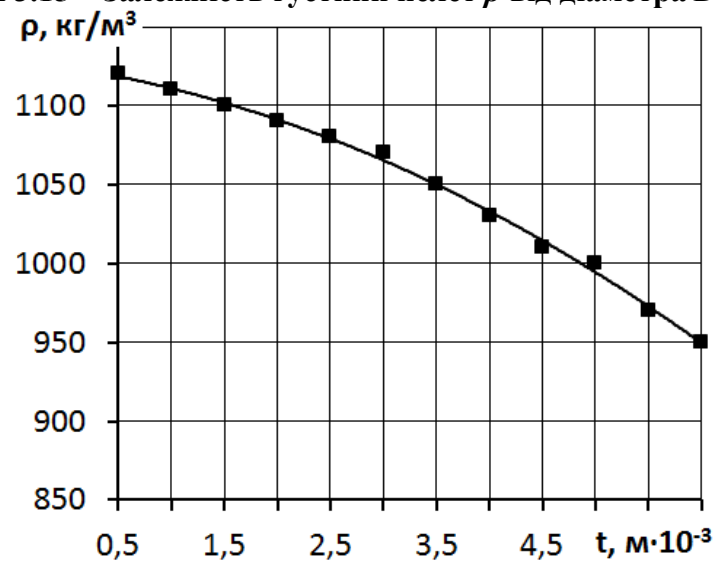


Рисунок 3.16 – Залежність густини пелет ρ від величини зазору t між роликом та матрицею

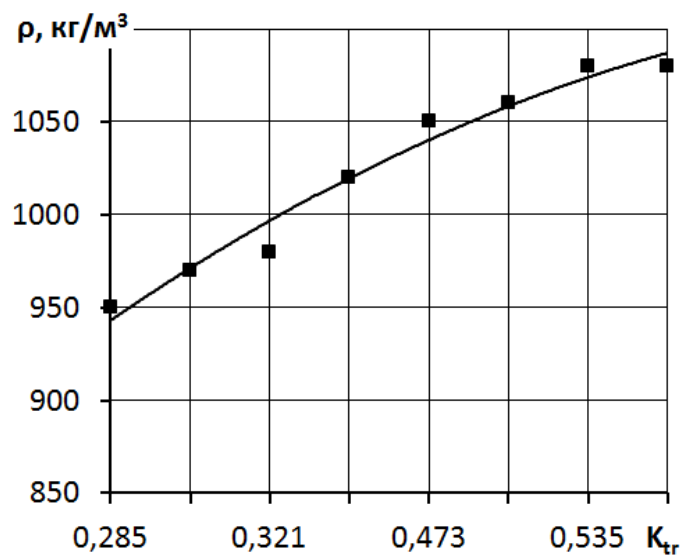


Рисунок 3.17 – Залежність густини пелет ρ від коефіцієнта тертя між лушпинням соняшника та матрицею

Аналіз отриманих залежностей (рис. 3.8-3.11) показав наступне:

- оптимальний діаметр філ'єри матриці для виготовлення пелет, наприклад з лушпиння соняшника, складає 8 мм. Збільшення діаметру призводить до зменшення густини, але підвищення продуктивності виготовлення біопалива. При зменшенні діаметра філ'єри від оптимального значення одержується протилежний результат;

- максимальні значення густини і продуктивності для лушпиння соняшника відповідають 70 мм довжини каналу філ'єри матриці, але при цьому густина (820 кг/м^3) нижча за європейські стандарти. Збільшення довжини каналу до 80 мм підвищує густина майже до 1200 кг/м^3 при незначному зменшенні продуктивності;

- густина пелет та продуктивність їх виготовлення для розглянутої біосировини знаходяться у протилежних залежностях від коефіцієнта тертя. Так, при зростанні коефіцієнта тертя густина підвищується, продуктивність зменшується, і навпаки;

- для оптимальних значень густини біопалива та продуктивності його виготовлення діаметр пресувального ролика повинен бути не менше 180 мм.

Зменшення діаметру каналу в матриці та зазору між роликом і матрицею позитивно впливає на підвищення густини виготовленого біопалива; збільшення довжини каналів в матриці, діаметра пресувального ролика та коефіцієнта тертя між сировиною та поверхнею каналу також підвищує густину пелет; найбільша густина гранул досягається при використанні матриць з кутом нахилу фаски отворів $\alpha = 45^\circ$.

Співставлення результатів експериментів за рисунками 3.8 і 3.12, 3-9 і 3.13 та 3.11 і 3.15 показує, що залежності діаметрів циліндричної частини філ'єри матриці та пресувального ролика і довжини філ'єри матриці від густини пелет, виготовлених з лушпиння соняшника, значно різняться, між собою, що також потребують додаткової експериментальної перевірки. Так, наприклад, густина лушпиння соняшника в залежності від довжини

філь'ери матриці від 40 до 80 мм збільшується на графіку (рис. 3.9) від 580 до 1200 кг/м³, а на графіку (рис. 3.13) – з 980 до 1100 кг/м³.

В експериментальних дослідженнях [46] вказується про незначний вплив довжини філь'ери матриці на густину пелет, виготовлених з твердих рослинних відходів.

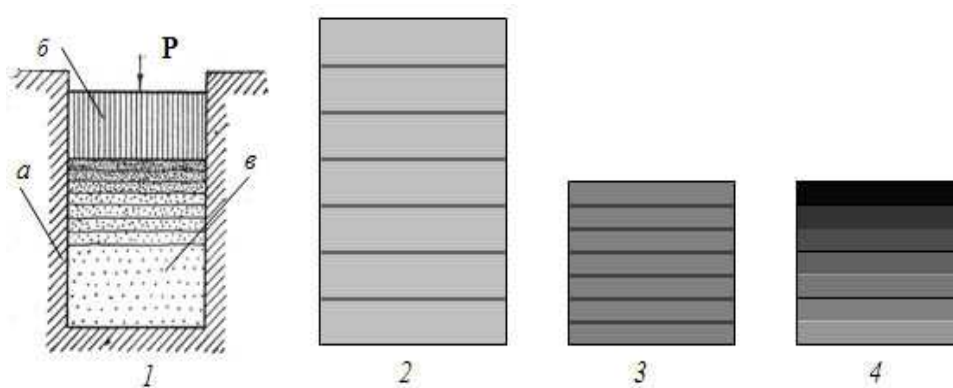
Аналізуючи результати залежностей (рис. 3.12-3.14), можна зробити висновок, що вони потребують додаткової експериментальної перевірки, оскільки вищі значення густини пелет при пресуванні лушпиння соняшника не відповідають максимальним значенням тиску.

Наявність екстремумів в залежностях (рис. 3.14) пояснюється підвищенням зовнішнього тертя при збільшенні кута отвору філь'ери матриці. При цьому частина сировини, яка контактує з поверхнею конусної частини філь'ери матриці, гальмується через підвищення коефіцієнта тертя, а центральна частина біоматеріалу проштовхується роликами одразу в циліндричну частину філь'ери з меншим ущільненням. Тому при кутах $\alpha > 50^\circ$ відбувається зменшення густини біопалива.

3.3. Теоретичні основи моделювання процесу пелетоутворення в закритій матриці

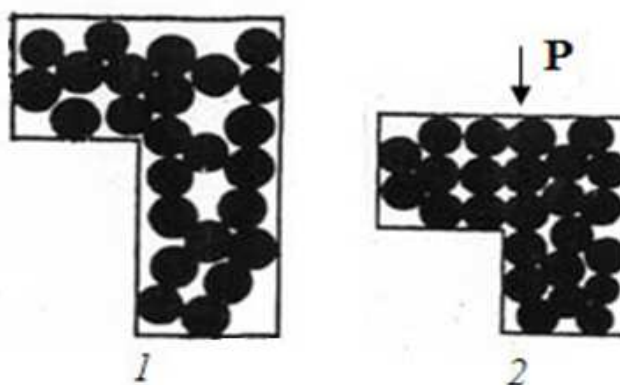
Механічну модель ущільнення частинок рослинних відходів в закритій циліндричній прес-формі при односторонньому їх пресуванні можна представити рисунком 3.18 [87].

При розгляданні ідеального випадку, коли частинки мали б сферичну форму, що не деформуються і не руйнуються, при відсутності сил взаємодії вкладалися б щільно і рівномірно. Однак внаслідок наявності сил адгезії і тертя сировина, що складається з частинок неправильної форми, заповнює прес-форму хаотично. Під дією зовнішнього тиску розташування частинок дещо упорядковується, і вони займають певне положення відносно одне одному (рис. 3.19).



1 – пристрій пресувального вузла (прес-форми): а – матриця, б – пуансон; 2 – об'єм матеріалу в прес-формі до пресування; 3 – те ж, після пресування в ідеальному зразку (без урахування тертя); 4 – розподіл густини при наявності тертя в реальному зразку (ступінь чорноти матеріалу характеризує його густина: чим темніше шар, тим вище густина)

Рисунок 3.18 – Модель ущільнення рослинних відходів



1 – розташування частинок матеріалу після засипання; 2 – те ж, після ущільнення

Рисунок 3.19 - Модель ущільнення дрібного матеріалу пресуванням

Задачею ущільнення є досягнення максимально можливого щільного упакування частинок, при якій досягається необхідна міцність. Щільне упакування частинок забезпечується при певному порядку їх укладання. Існує кілька способів укладання частинок. Найбільш просто і упорядковано укладаються частинки сферичної форми і однакового розміру.

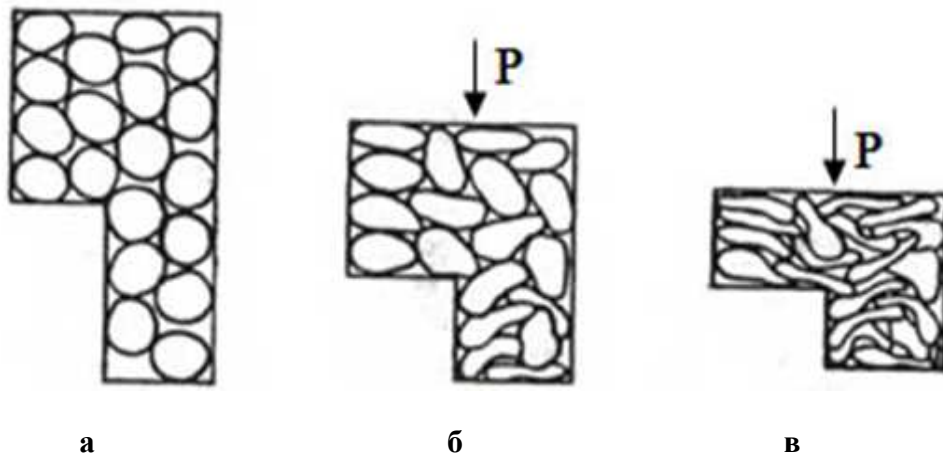
Реальний матеріал складається з частинок різного розміру і форми. Для визначення ступеню відхилення форми реальних частинок від

сферичної слугує коефіцієнт несферичності f , який розраховується за формулою [88]:

$$f = F_q / S_c,$$

де F_q – поверхня частинки довільної форми; S_c – поверхня сфери, що еквівалентна за об'ємом даній частинці.

Пресування рослинних відходів можна вважати як ущільнення масиву частинок шляхом їх деформації без руйнування з в'язкоплинним заповненням порожнин. Такий процес можна представити у наступному порядку (рис. 3.20) [89].



а – розташування частинок біосировини після засипання; **б** – те ж, після часткового стиснення; **в** – те ж, після завершення пресування

Рисунок 3.20 – Модель пресування рослинних відходів

При завантаженні сировини у прес-форму (рис. 3.20, а), частинки розташовуються в ній у хаотичному порядку, утворюючи порожнини. При прикладанні зусилля P (рис. 3.20, б) частинки зазнають пластичної деформації і під дією пуансона розплющуються та заповнюють порожнини. Повітря, розподілене між частинками, виштовхується через міжчастинкові нещільності та зазори прес-форми. При заповненні шпарин (рис. 3.20, в), процес стиснення може бути припинено, оскільки після завершення виштовхування більшої частини повітря і заповнення прес-

форми, починається пружне стиснення сировини і залишків повітря, що не встигло залишити матеріал. Тому пружне стиснення після зняття тиску може викликати розширення і розшарування зразка, що призведе до втрати ним міцності. Крім того, таке стиснення нераціональне і з точки зору зайвої витрати енергії на такий стиск.

При використанні в процесі пресування композитних матеріалів різної міцності і характером деформації, поведінка таких сумішей може відрізнятися великим різноманіттям і залежить від багатьох чинників: компонентним співвідношенням, властивістю окремих компонентів, розмірів їх частинок, тиску пресування тощо. Передбачити особливості поведінки таких сумішей при пресуванні доволі складно. Однак, можна виділити характерні відмінності, притаманні таким сумішам. Вони зводяться до наступного.

Характер сумішей визначається властивостями деякого компонента, значення якого переважають над рештою і необов'язково, щоб його кількість у суміші була найбільшою. Так, якщо у суміші знаходяться пластичні матеріали, вони можуть визначати тип деформації як пластичний, якщо їх об'єм перевищує шпаристість крупних фракцій. При стиску вони швидко заповнюють порожнини, створюють протитиск і знижують руйнування, наприклад, крихких частинок.

При досягненні високих тисків має місце витискування пластичних матеріалів та рідких фаз, що призводить до необхідності лімітувати цей тиск.

Наявність значної кількості тонких та дрібних частинок визначає пресування як пластичне, оскільки такі матеріали з певною вологістю поведуться як пластичні матеріали.

При пресуванні крихких частинок спочатку руйнуються менш міцні частинки, потім деформується пластичний матеріал. Якщо зусилля його деформації незначні, він деформується у першу чергу. Останніми руйнуються найбільш міцні компоненти.

Ці особливості необхідно враховувати при використанні сумішей, оскільки недостатнє їх урахування буде призводити до виготовлення неякісного біопалива, невиробничим витратам, передчасному зносу обладнання тощо.

Математичні моделі. Основним показником, що характеризує процес пресування різних матеріалів у закриту матрицю, є густина виготовлених брикетів, яка залежить від тиску, що прикладається до матеріалу [89]. Залежність між цими величинами дозволяє визначати зусилля, що діють в деталях і механізмах машин та енергію, яка необхідна для ущільнення.

На даний час для опису таких залежностей використовуються напівемпіричні та емпіричні рівняння, отримані на основі експериментальних досліджень, переважна частина яких стосується пресування металевих порошків. Можна вважати, що між пресуванням металевих порошків і подрібнених рослинних відходів і композитів на їх основі існує певна аналогія. Тому в першому наближенні для оцінки залежності властивостей біопаливних пелет від параметрів процесу пресування, характеристик сировини та пресового обладнання можна використовувати рівняння, отримані для пресування металевих порошків.

Для випадків пресування металевих порошкових матеріалів в діапазоні середніх і відносно високих значень тисків і густини М.Ю. Бальшин [90] запропонував декілька видів рівнянь зв'язку густини і об'єму брикетів від тиску пресування:

$$\lg p = -L(\beta - 1) + \lg p_{\max},$$

$$\lg p = -m \lg \beta + \lg p_{\max},$$

$$\lg p = m \lg \beta + \lg p_{\max},$$

де p – прикладений тиск пресування; $p_{\max}$ – тиск пресування, що забезпечує одержання безшпаристих зразків; L і m – сталі, що враховують природу

матеріалу, які названі відповідно фактором і показником пресування; β і ϑ відносні об'єм і густина зразка.

Ці залежності визначали з урахуванням наступних припущень:

- зміцнення при пластичних деформаціях матеріалу в контактній зоні відсутнє, що обумовлює постійність контактного тиску σ_k ;
- закон Гука, що виражає залежність між пружними деформаціями і стискувальною нормальною напругою в компактному матеріалі, згідно якому нескінченно малий приріст деформації пропорційний нескінченно малому приросту напруги, справедливий і для пластичної деформації;
- матеріал частинки в зоні контакту постійно знаходиться у напруженому стані, близькому до одноосьовому стиску.

Незручністю даних формул є те, що фактор пресування L значно змінюється навіть у невеликих інтервалах тисків, оскільки визначається наступною залежністю [90]:

$$L = 0,434 \frac{k'}{\sigma_k} \cdot \frac{h_k}{h_0},$$

де k' – постійний коефіцієнт; σ_k – контактний тиск; h_k – приведена висота зразка, тобто висота зразка при густині 100%; h_0 – початкова висота матеріалу у прес-формі.

В роботі [91] на підставі дослідних даних показана можливість опису процесу ущільнення через коефіцієнт ущільнення K :

$$K = \frac{d\gamma}{dp} = K_0 e^{-ap},$$

де K_0 – початковий коефіцієнт пресування (при тиску $p = 0$); a – коефіцієнт втрати стиснення, що характеризує відносне зменшення K при зростанні тиску p на одиницю.

Інтегрування останнього виразу приводить до рівняння пресування виду:

$$\gamma = \gamma_{np} - \frac{K_0}{\alpha} e^{-\alpha p},$$

де γ_{np} – умовна гранична густина матеріалу при відносно великому тиску пресування, причому ця густина вище теоретичної густини матеріалу, що пресується.

Константи K_0 , α і γ_{np} характеризують матеріал, що пресується і визначаються експериментальним шляхом.

Останнє рівняння пресування виведено на підставі гіпотези суцільності і з високою точністю описує процес ущільнення матеріалу в широкому діапазоні тисків і густини.

В роботі [92] запропонована експериментальна залежність густини упакування сипких матеріалів, що визначається по ступені зменшення об'єму матеріалу R_v , від зміни тиску пресування для випадку непластичної деформації частинок:

$$R_v = \frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{a_1 b_1 N_{np}}{(1 + b N_{np})},$$

де V_0 і V – об'єм сипкого матеріалу до і після пресування відповідно; N_{np} – величина тиску пресування; a_1 , b і b_1 – коефіцієнти, що характеризують властивості сипкого матеріалу.

Автори [92] запропонували для оцінки тиску пресування використовувати наступну залежність:

$$\rho = \rho_{np} - \left(\frac{K_0}{\alpha} \right) e^{-\alpha p},$$

де ρ_{np} – гранична густина суцільного тіла; K_0 – початкове значення коефіцієнта пресування, $K = d\rho/dp$; α – коефіцієнт втрати стискання; p – тиск на суміш.

При дослідженні процесу брикетування соснової тирси вологістю 8-12 % одержана залежність тиску пресування від густини біопалива [93]:

$$P = C[e^{a(\rho - \rho_0)} - 1],$$

де C і a – коефіцієнти, що залежать від початкової густини матеріалу: $C = 0,3913 + 0,00055\rho_0$; $a = 5,82 \cdot 10^{-3} - 0,0054 \cdot 10^{-3}\rho_0$.

Графічно дана залежність представлена на рисунку 3.21.

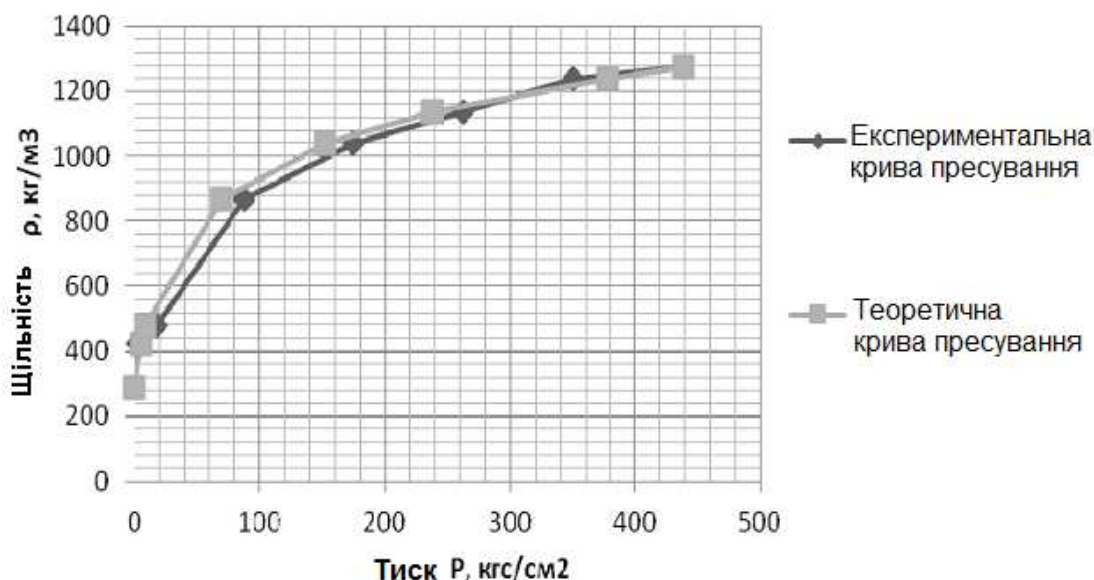


Рисунок 3.21 – Експериментальна і теоретична діаграми пресування соснової тирси

Результатами досліджень встановлено, що фізична сутність процесу пресування полягає у витисненні газоподібної фази, зближенні часточок матеріалу, що ущільнюється і збільшенні молекулярних сил зчеплення між поверхнями окремих частинок. Весь процес ущільнення можна поділити на три етапи.

На першому етапі значно зменшується об'єм матеріалу, що супроводжується переміщенням його у поздовжньому і поперечному напрямках каналу пресування. При цьому з матеріалу виштовхується повітря, частинки зближуються між собою, їх взаємне розташування стабілізується, і збільшується площа дотику частинок між ними. Підвищення густини матеріалу відбувається при незначному зростанні тиску. Енергія, що підводиться до матеріалу на цьому етапі, витрачається,

в основному, на подолання тертя між часточками, на тертя їх об стінки пресувального каналу і на витиснення повітря.

Другий етап характеризується інтенсивним розвитком пружнов'язких деформацій і швидким підвищенням тиску пресування. У порівнянні з першим етапом тиск значно зростає при меншій деформації матеріалу. Частина енергії, що підводиться, витрачається на подолання внутрішнього тертя і руйнування частинок. Друга частина накопичується у спресованому матеріалі.

На третьому етапі стискується сформований брикет. Це супроводжується швидким зростанням тиску при незначному підвищенні густини. Залежність між деформацією матеріалу і тиском на цьому етапі практично лінійна. При цьому деформація носить пружний характер. Енергія, що підводиться до матеріалу на цьому етапі, накопичується у вигляді пружної енергії.

Розділ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ БІОПАЛИВА З РОСЛИННИХ ВІДХОДІВ ТА КОМПОЗИТІВ НА ЇХ ОСНОВІ

Виготовлення твердого біопалива з рослинних відходів відбувається шляхом з'єднання окремих елементів клітковини до стану, коли між ними починають діяти міжмолекулярні та міжатомні зв'язки. Цього стану можна досягнути шляхом пресування з використанням відносно великих тисків, при яких відбувається безперервне підвищення густини клітковини.

Для виробництва пелет з високими фізико-механічними та теплофізичними характеристиками необхідне відповідне пресове обладнання [94]. Одним з головних елементів пресового обладнання, від якого залежить якість виготовленого біопалива, є матриця. Профіль філ'єри матриці, а саме зона входження матеріалу (довжина конусної частини, кут конусу), діаметр циліндричної частини і її довжина, зона виходу матеріалу впливає на властивості виготовлених гранул (густина, міцність, крихкість тощо). Окрім того, перед гранулюванням кожний вид рослинних відходів та композитів на їх основі мають свої фізико-механічні характеристики. Це фактично унеможлиблює на даний час розробку тільки на основі теоретичних методів рекомендацій для створення пресового обладнання з оптимальними конструкціями матриць.

Отже, проведення експериментальних досліджень виготовлення якісного біопалива з рослинних відходів та композитів на їх основі з метою отримання даних для розробки рекомендацій з вибору оптимальних конструктивних параметрів матриці є необхідним і актуальним.

4.1. Експериментальні дослідження виготовлення пелет з рослинних відходів у відкриту матрицю

Матеріали та обладнання для проведення експериментальних досліджень. Для експериментальних досліджень виготовлення пелет використовувались рослинні відходи та їх суміші, перелік та основні характеристики яких наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Види рослинних відходів, що використовувались при дослідженнях

Сировина	Листя клену	Листя дуба	Солома	Тирса	Лушпиння соняшника	Суміш тирси з соломою (1/1)	Суміш соломи з лушпинням соняшника (1/1)
Вологість, %	20-25	9; 32	9; 32	9; 32	9	9	9
Фракція, мм	1-4	0,1-1,0	1-4	0,1-1,0	2-8	-	-

Виготовлення пелет з рослинних відходів методом екструзії здійснювали з використанням універсальної випробувальної машини УІП-50 (рис. 4.1), робоча частина якої показана на рисунку 4.2 та спеціально виготовленого пресового пристрою (рис. 4.3).



Рисунок 4.1 – Універсальна випробувальна машина УІП-50



Рисунок 4.2 – Робоча частина універсальної випробувальної машини УИП-50 з встановленим пресовим пристроєм

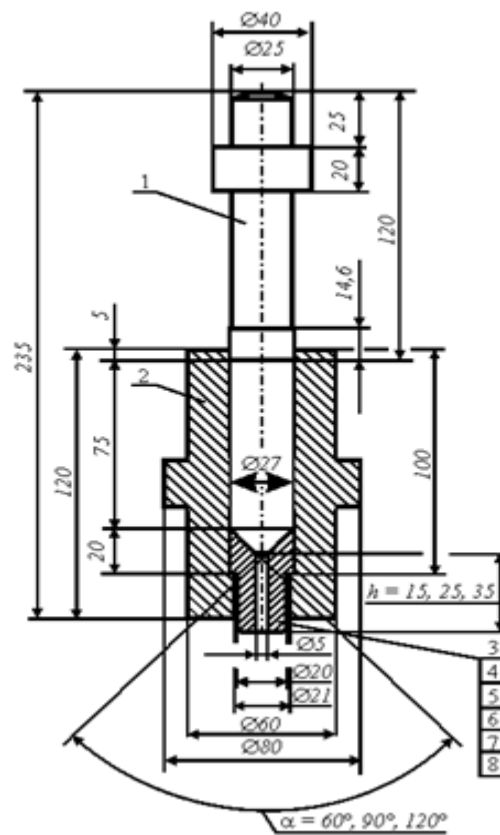


Рисунок 4.3 – Пресовий пристрій

Технічна характеристика машини УІП-50

Потужність електродвигуна насоса, кВт.....	2,8
Максимальний робочий тиск насоса, МПа.....	23,5
Діапазон навантажень, що заміряється, кН	0 – 50
	0 – 100
	0 – 250
	0 – 500

Ціна поділки шкали силовимірювача при діапазоні навантажень, що заміряються, кН:

від 0 до 50 кН.....	0,1
від 0 до 100 кН.....	0,2
від 0 до 250 кН.....	0,5
від 0 до 500 кН	1,0.

Габарити машини, що встановлена на фундамент, мм:

довжина	288
ширина	1180
висота	5330.

Маса машини складає 2668 кг та включає в себе вагу, кг:

насоса.....	288
преса	2160
силовимірювача	220.

Машина УІП-50 дозволяє виконувати випробування на стиск при максимальному навантаженні 500 кН. Крім вузла робочої частини, до складу УІП-50 входять також силовий агрегат та силовимірювач. Силовий агрегат являє собою гідравлічний насос, який приводиться в дію електричним двигуном. Силовий агрегат зв'язаний трубопроводами з силовимірювачем та робочою частиною.

Силувимірювач машини УІП-50, що складається з гідравлічного циліндра, маятника, зубчастої передачі та зубчастої рейки, визначає навантаження преса та дозволяє графічно визначати зміну такого навантаження від переміщення.

Пресовий пристрій (рис. 4.3) складався з наступних основних елементів: пуансона 1 для пресування і екструзії; корпус-матриці 2; комплекту змінних матриць, що використовувались для виготовлення пелет з рослинних відходів та опалого листя клену 3, 4, 5, 6, 7, 8 (рис. 4.4), які дозволяли дискретно варіювати факторами h (15, 25, 35 мм) та α (60° , 90° , 120°).

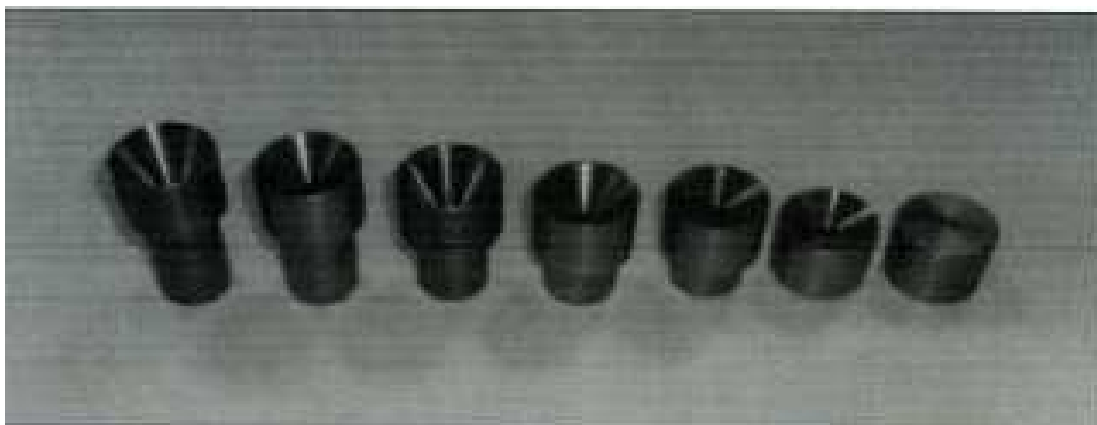


Рисунок 4.4 – Змінні матриці для пресового пристрою

Для виготовлення пелет з соломи, тирси, лушпиння соняшника та їх сумішей, крім вище зазначених елементів пресового обладнання в експериментах застосовувалась матриця з діаметром циліндричної частини філ'єри $d = 10$ мм, а з метою зменшення коефіцієнта тертя матриця з подвійним кутом входу біоматеріалу менше 60° (рис. 4.5), (табл. 4.2).

Вологість сировини вимірювалась за стандартною методикою [95], густина зразків біопалива визначалась за допомогою електронних вагів з ціною поділу 1×10^{-5} кг.

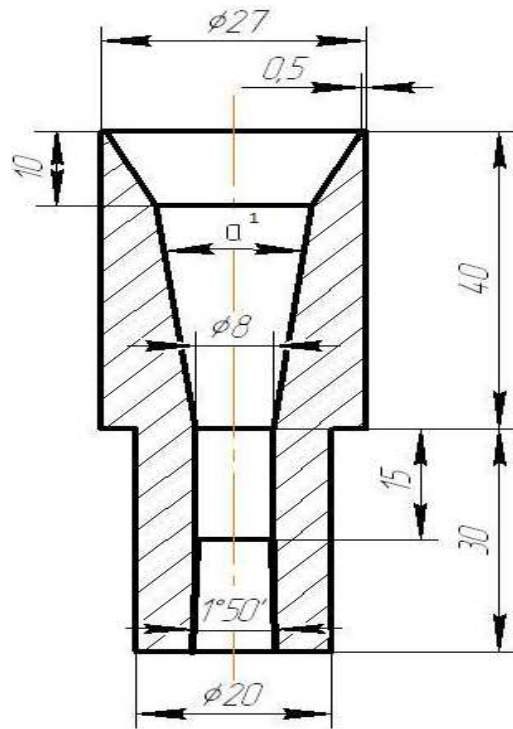


Рисунок 4.5 – Матриця з подвійним кутом входу біоматеріалу

Таблиця 4.2 - Параметри конструктивних елементів філ'єр матриць

Діаметр циліндричної частини d , мм	Кут першого вхідного конусу філ'єри	Кут вхідного конусу філ'єри , α^1	Довжина циліндричної частини h , мм
8	50°	12°, 20°	30

Методика проведення експериментів та обробки експериментальних даних. При експериментальних дослідженнях виготовлення пелет з рослинних відходів та опалого листя клену застосовувалася наступна технологічна послідовність [96]:

- збір рослинних відходів та листя, відокремлення від них металевих та сторонніх предметів;
- здрібнення рослинних відходів та листя з використанням шнекового здрібнювача;
- підсушування або зволоження рослинних відходів або листя;

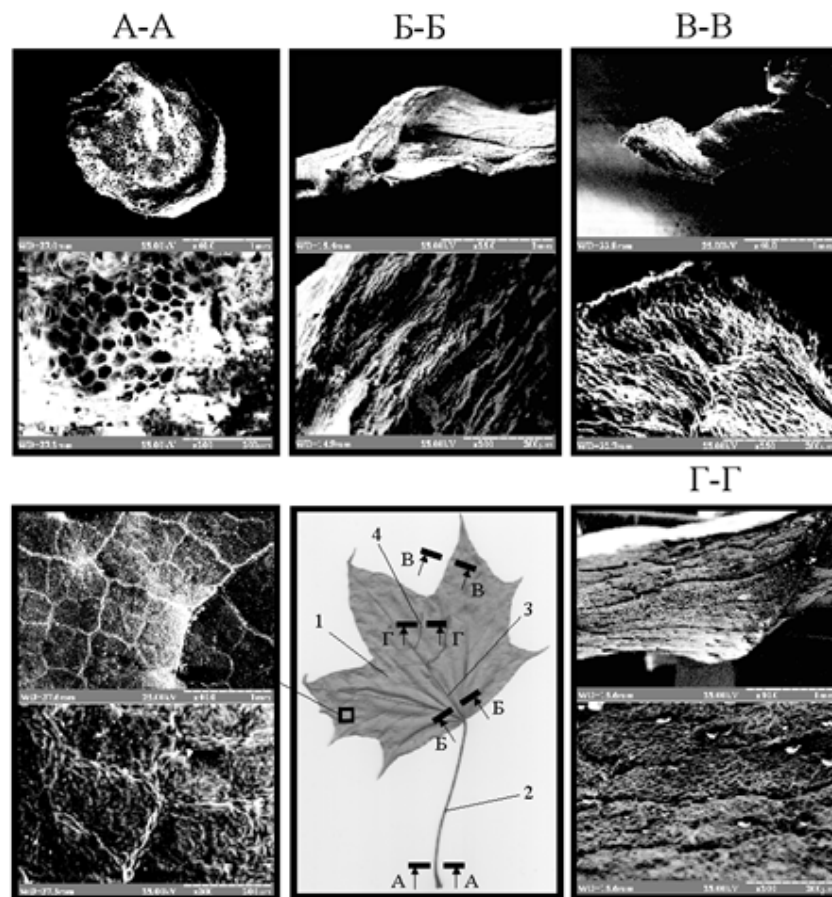
- екструзія здрібнених рослинних відходів та листя з вільним витіканням зразків у звужену матрицю.

Осіньне опале листя (рис. 4.6) неоднорідне за структурою (рис. 4.7) та за ступенем зів'янення (табл. 4.3). В ньому розрізняють плоску пелену, товщина якої не перевищує 0,1 мм і відносно тверду ніжку, діаметр якої лежить в межах від 1 до 2 мм [96]. Відносна жорсткість листа, що характеризується відношенням найбільшої її ширини до товщини пелени, досягає 2000. На пелені листа віялоподібно відходять від ніжки затверділі капілярні потовщення (завтовшки до 0,5 мм) для постачання листів рідиною, які надають листу додаткову жорсткість.



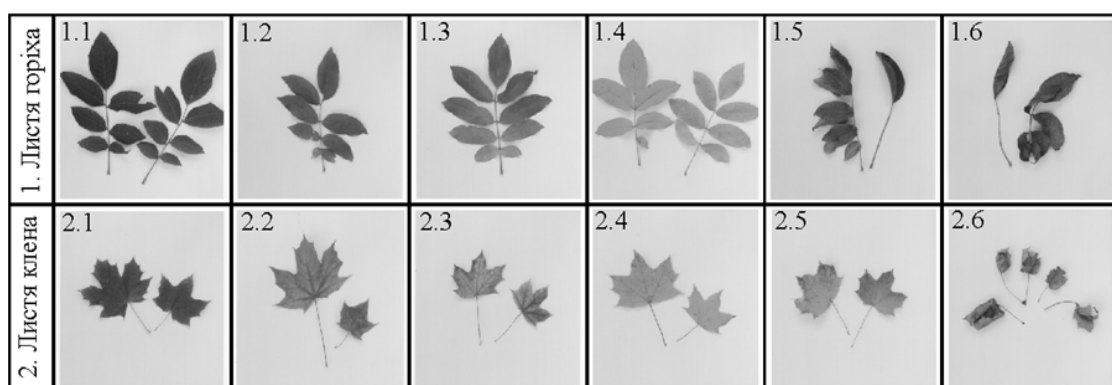
Рисунок 4.6 – Зібране опале листя клену

Тому, для утворення більш міцної структури пелет за рахунок використання однорідної маси сировини, перед пресуванням осіньне листя піддавали здрібненню (рис. 4.8, а), зокрема з використанням шнекового подрібнювача (перше ущільнення в напрямку підвищення густини).



1 – пелена, 2 – ніжка, 3,4 – капілярні потовщення, відповідно I та II порядку

Рисунок 4.7 – Структура осіннього листа клену у фрактографіях його елементів



Таблиця 4.3 – Осінніє листя за ступенем зів'янення

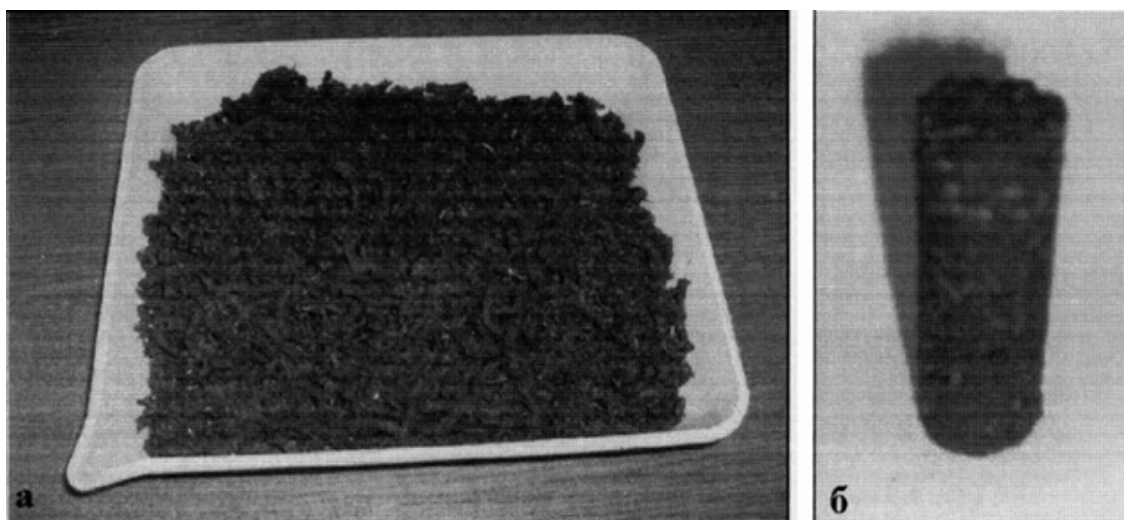


Рисунок 4.8 – Опале листя після здрібнення (а) та заготовка з нього для вимірювання густини (б)

Густину опалого листя клену ρ_m у мішку (густину сировини) визначали як середнє арифметичне від його густини у п'яти мішках:

$$\rho_m = \sum \rho_i / 5.$$

Для визначення густини здрібненого опалого листя, за допомогою спеціальної матриці попередньо виготовляли циліндричний зразок (рис. 4.7б), який вимірювали та зважували.

Здрібненню піддавали також листя дубу та соломи, лущиння соняшника і тирса підлягали термічній обробці.

Вологість сировини вимірювалась за стандартною методикою [96], густина зразків біопалива визначалась за допомогою електронних вагів з ціною поділу 1×10^{-5} кг.

Методика виготовлення пелет. Процес екструзії відбувався наступним чином. В робочу порожнину корпус-матриці 2 (рис. 4.3) встановлювалась певна змінна матриця та завантажувалась попередньо здрібнена біосировина з рослинних відходів та опалого листя. Потім в корпус вставлявся пуансон 1 і в такому вигляді пресовий пристрій встановлювався на випробувальну машину УИП-50 та навантажувався. При стисненні біосировини відбувалась її екструзія із циліндричного отвору філь'ери змінної матриці діаметром 5 мм у вигляді пелет. Утворені

пелети накопичувались у піддоні, який встановлювався під штампом. Зусилля екструзії пеллет записується на паперовий носій.

Методика математичного планування експерименту. Для отримання математичної моделі густини пелет з опалого листа клену використовувався метод планування експерименту [97, 98].

Аналіз густини опалого листа клену після процесу здрібнення показав, що її значення підвищилось у 6,5 рази до $0,92 \text{ г/см}^3$, у порівнянні з густиною $0,141 \text{ г/см}^3$, яке відповідало зібраній сировині у мішках.

Для встановлення умов проведення процесу екструзії сировини з опалого листа клену, на підставі апріорної інформації було вибрано фактори, що впливають на густину виготовлених пелет: довжина матриці h (X_1), мм; та кут матриці на вході біосировини до її конусної частини α (X_2), град (рис. 4.9).

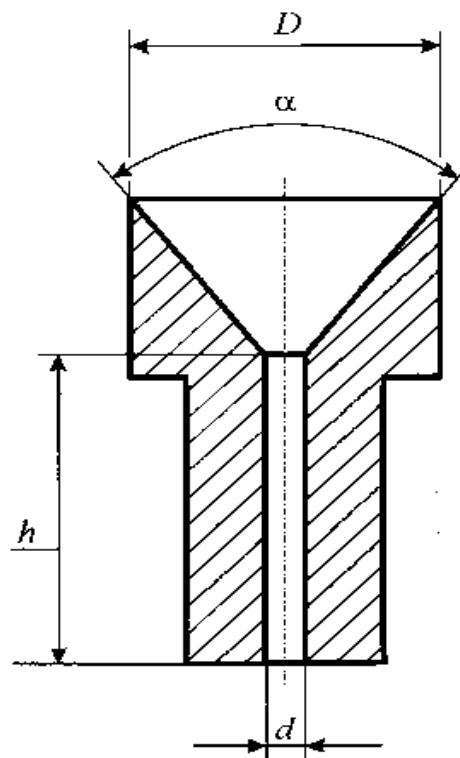


Рисунок 4.9 – Матриця для екструзії пеллет

Вибрані фактори відповідають умові керованості та однозначності. Решта параметрів процесу були зафіксовані на постійних рівнях: вхідний

діаметр матриці $D = 27$ мм, циліндричний діаметр філ'єри матриці $d = 5$ мм.

При проведенні експериментів фіксували зусилля екструзії. Після одержання зразків пелет проводили розрахунок їх густини.

Значення факторів на основному, верхньому та нижньому рівнях, а також інтервали варіювання наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Матриця планування експерименту (план 2^3)

Фактор				h , мм	α , град	$\rho_{\text{мок}}$, г/см ³	$\rho_{\text{сух}}$ г/см ³
Основний рівень (X_{i0})				25	90		
Інтервал варіювання (ΔX_i)				10	30		
Верхній рівень ($X_i = +1$)				35	120		
Нижній рівень (-1)				15	60		
Код				x_1	x_2	y_1	y_2
Номер дослідів	1	Порядок реалізації	2	+	+	1,23	0,74
	2		1	-	+	1,20	0,73
	3		4	+	-	1,32	0,80
	4		3	-	-	1,24	0,75
Досліди у центрі плану		1		0	0	1,27	0,77
		2		0	0	1,25	0,76
		3		0	0	1,25	0,76
		4		0	0	1,25	0,76

Значення факторів у кодовому (x_i) і натуральному (X_i) масштабах зв'язані співвідношеннями:

$$x_1 = (X_1 - 25)/10;$$

$$x_2 = (X_2 - 90)/30.$$

Повний факторний експеримент для двох факторів (k) і двох рівнів (P) повинен включати в себе таку кількість дослідів:

$$N = P^k = 2^2 = 4.$$

Задача зводилась до побудови лінійної математичної моделі виду

$$y = b_0 + \sum b_i x_i,$$

де b_0, b_i – коефіцієнти регресії моделі.

Результати дослідження процесу утворення пелет з опалого листя клену та їх аналіз. Відповідно до вибраного плану (2^2) було проведено 4 досліди.

Дані для розрахунків дисперсії досліду внесені в таблицю 4.5.

Таблиця 4.5 – Дані для розрахунку дисперсії в експериментах

Номер дубля	Y_{0q}	$\Delta y = (y_{0q} - y_0)$	Δy^2
1	1,27	0,015	0,00025
2	1,25	0,005	0,000025
3	1,25	0,005	0,000025
4	1,25	0,005	0,000025
	$y_0 = 1,255$		$\sum \Delta y^2 = 0,000325$

Дисперсія досліду визначалась за виразом:

$$S_y^2 = \frac{\sum (y_{0q} - \bar{y}_0)^2}{f_1} = 0,000325/3 = 0,000108,$$

де y_{0q} - результат q -го повтору досліду у центрі плану; y_0 – середнє арифметичне значення всіх n_0 повторів центрального досліду; f_1 – число степенів свободи:

$$f_1 = n_0 - 1 = 4 - 1 = 3.$$

Тоді відповідно

$$S_y = 0,0104.$$

Коефіцієнти регресії розраховували за формулою:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} Y_u}{N}, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

де N – число дослідів, $N = 4$.

Тоді:

$$b_0 = (1/4)(1,23 + 1,20 + 1,32 + 1,24) = 1,247;$$

$$b_1 = (1/4)(1,23 - 1,20 + 1,32 - 1,24) = 0,0275;$$

$$b_2 = (1/4)(1,23 + 1,20 - 1,32 - 1,24) = -0,0325.$$

Перевірка статистичної значимості коефіцієнтів регресії шляхом розрахунку дисперсії оцінок здійснювалася за формулою:

$$S_{bi}^2 = S_y^2 / N = 0,000108 / 4 = 0,000027.$$

Відповідно середньоквадратична помилка:

$$S_{bi} = \sqrt{S_{bi}^2} = 0,0052.$$

За рівнем значимості $\alpha = 0,05$ та числом ступенів свободи $f_l = 3$, табличне значення t -критерія Стюдента $t_{0,05;3} = 3,18$.

Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії:

$$\Delta b_i = t_{\alpha, f} S_{bi} = 3,18 * 0,0052 = 0,0165.$$

Ті коефіцієнти регресії, для яких виконується вимога $|b_i| \geq \Delta b_i$, слід визнати статистично значимими. В даному випадку для всіх коефіцієнтів регресії виконується вимога $|b_i| \geq \Delta b_i$, тому вони визначаються як статистично значимі.

Будуємо рівняння регресії (математичну модель) загального виду:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2,$$

яка для наших умов має вид:

$$y = 1,247 + 0,0275x_1 - 0,0325x_2.$$

Перевірка гіпотези про адекватність моделі за t -критерієм Стюдента:

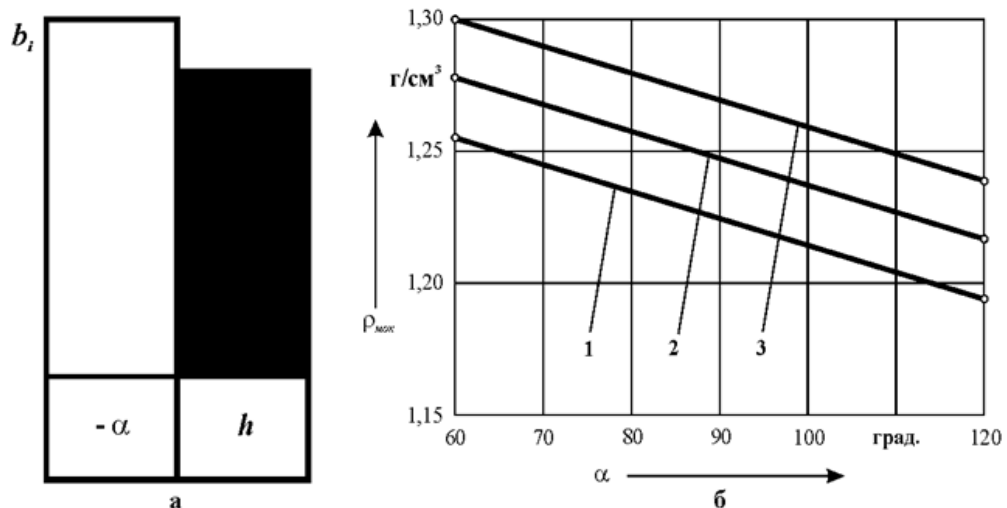
$$t^{\text{пор}} = \frac{|b_0 - \bar{y}_0| \sqrt{N}}{S_y}.$$

Якщо $t^{розр} \leq t_{a,f}^{таб} = 3,18$, то гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється:

$$t^{розр} = ((1,255-1,247)\sqrt{4})/0,0104 = 1,538.$$

Отже, гіпотеза про адекватність моделі приймається.

Аналіз отриманої математичної моделі показує, що найбільший вплив на густина пелет $\rho_{мок}$ чинить кут матриці на вході здрібненого листа в матрицю α , із зменшенням якого густина збільшується (рис. 4.10). Таким чином, кут α можна розглядати як основний керуючий фактор. Вплив довжини робочого вікна матриці для прямого видавлювання h на $\rho_{мок}$ дещо менший, але також має суттєве значення. З його підвищенням густина пелет збільшується.



а – ступінь впливу чинників; б – графічна залежність 1 – $h = 15$ мм; 2 – $h = 25$ мм; 3 – $h = 35$ мм

Рисунок 4.10 – Залежність густини $\rho_{мок}$ пелет з опалого листа клену після екструзії від α і h

На рисунку 4.10, б представлена залежність $\rho_{мок} = f(\alpha, h)$, яка показує вплив чинників на густина пелет у вибраному факторному просторі їх зміни.

В рамках експерименту густина пелет $\rho_{мок}$ (рис. 4.11) змінювалася у межах від 1,19 до 1,30 г/см³, що приблизно в 1,3...1,4 рази перевищує

густину листя після здрібнення та попереднього ущільнення ($\rho_m = 0,92$ г/см³). Останнє обґрунтовує доцільність використання метода екструзії для виготовлення щільних пелет з опалого листя, що має високу вологість, на пресах з вертикальним рухом пуансона.



Рисунок 4.11 – Вид гранули після екструзії, виготовленої з опалого листя клену

В результаті аналізу фіксованого зусилля екструзії пелет P при постійній (середній) довжини робочого вікна h , отримано графічну залежність P від кута матриці α на вході здрібненого листя в матрицю (рис. 4.12).

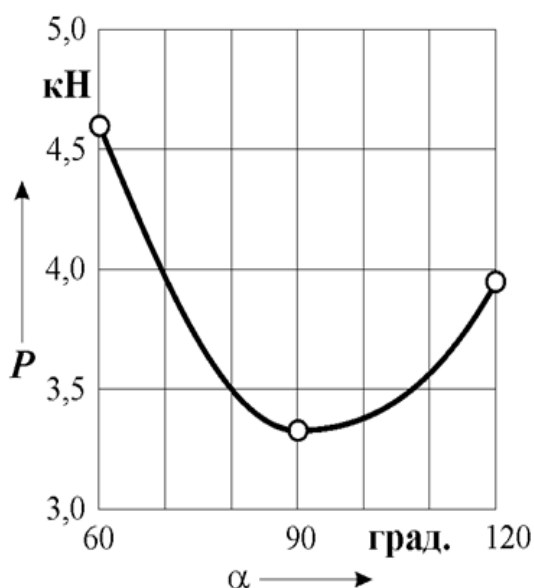


Рисунок 4.12 – Залежність зусилля екструзії пелет P від кута α матриці

Аналіз залежності свідчить, що при $\alpha = 90^\circ$ вона має екстремум, який характеризується найменшим зусиллям при екструзії пелет.

Враховуючи зростання сил тертя біосировини вздовж конічної поверхні матриці зі збільшенням куту α від 60° до 120° , залежність 4.11 потребує додаткової перевірки.

Значення густини одержаних пелет з опалого листя клену внаслідок природного сушіння через певний час змінилось до $\rho_{\text{сух}}$. При цьому пелети змінили зовнішній вид, форму і густину (рис. 4.13).



Рисунок 4.13 – Пелети з листя клену після сушіння

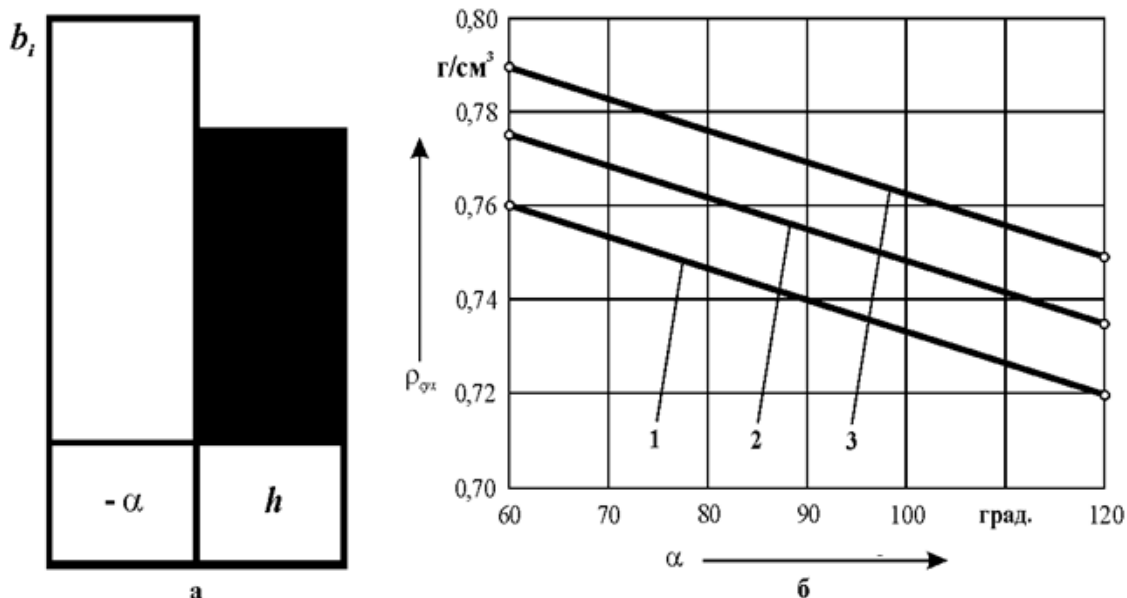
Вираз для визначення густини пелет після природного сушіння $\rho_{\text{сух}}$ (y_2) (табл. 4.4), має вигляд:

$$y_2 = 0,755 + 0,015x_1 - 0,02x_2.$$

Аналіз результатів показав (рис. 4.14), що найбільший вплив на $\rho_{\text{сух}}$ чинить кут матриці на вході здрібненого листя в матрицю α , із зменшенням якого густина збільшується.

Вплив довжини матриці при екструзії h на $\rho_{\text{сух}}$ дещо менший, але також суттєвий. З його підвищенням густина сухих пеллет збільшується. В рамках експерименту густина сухих пелет $\rho_{\text{сух}}$ змінювалася у межах від $0,73$ до $0,80 \text{ г/см}^3$, яка відповідає густини компактної деревини клена, але

нижча від європейських стандартів [12]. Пелети з такої сировини мали недостатні якісні фізико-механічні характеристики, що негативно впливатиме на процеси їх зберігання і транспортування.



а – ступінь впливу чинників; б – графічна залежність: 1 - $h = 15$ мм; 2 - $h = 25$ мм; 3 - $h = 35$ мм

Рисунок 4.14 – Залежність густини отриманих після екструзії сухих пелет $\rho_{\text{сух}}$ від α та h

Підвищений вміст води в опалому листі клену позитивно впливає як на процес формування пелети, так і на її екструзію оскільки:

- вода виконує роль поверхнево-активного компонента, який покращує зв'язування частинок сировинного матеріалу;
- вода діє як змащувальна речовина, поліпшуючи екструзію пелет.

Досвід виготовлення пелет з рослинних відходів вологістю понад 14% показує, що після їх підсушування таке біопаливо стає крихким і не придатним для транспортування [12]. Тому перед пресуванням біосировину з високою вологістю потрібно підсушувати.

Результати та аналіз дослідження процесу утворення пелет з твердих рослинних відходів та їх сумішей. Результати досліджень по

виготовленню пелет з соломи, тирси, лушпиння соняшника та їх сумішей підтвердили попередню апріорну та апостеріорну інформацію про ускладнення руху біосировини зі зниженою вологістю вздовж філь'єри матриці. Так, в процесі стиснення з використанням всього переліку матриць у пресовому пристрої та всіх рослинних відходів та їх сумішей (при вологості 9 %), що застосовувались в експериментах, пелетоутворення не відбувалось навіть за високих тисків (400 МПа). При цьому сировина втрачала пружні властивості і перетворювався в суцільну структуру в конусній частині матриці і корпусі преса (рис. 4.15).



Рисунок 4.15 - Форма стисненої соломи в конусі матриці і корпусі пресового пристрою



Рисунок 4.16 – Матриця пресового пристрою з нашаруванням суміші лігніну та часточками рослинних відходів

При значних зусиллях пресування відбувалось значне виділення лігніну, сліди якого разом з часточками біосировини спостерігались на конусній поверхні філь'єри матриці після виймання зразка (рис. 4.16).

Дослідженнями встановлено, що при пресуванні суміші з використанням лушпиння соняшника (вологість 9%) утворюються пелети, які після виймання з корпусу пресового пристрою розшаровуються.

При пелетуванні рослинних відходів з підвищеним вмістом води, міжмолекулярні зв'язки між часточками зменшуються, що приводить до зростання пластичності біоматеріалу. Так, наприклад, при застосуванні в

експериментах соломи і тирси вологістю 32%, зменшувалось внутрішнє і зовнішнє тертя в конусній частині матриці та відбувалось просування біосировини вздовж філь'єри з виготовленням гранул. Але при цьому на виході зразків з філь'єр матриць на них утворювались тріщини і пелети руйнувались (рис. 4.17, 4.18), що пояснюється збільшенням об'єму гранул під дією пружних сил біоматеріалу.



Рисунок 4.17 – Зразок гранули, виготовленої з листя дубу при вологості 32%



Рисунок 4.18 – Зразок гранули, виготовленої з тирси з вологістю 32%

Також результатами досліджень встановлено, що змащення машинним мастилом поверхні конусу матриці перед завантаженням біосировини, сприяє проходженню її вздовж філь'єри і утворенню пелет.

Отже за результатами експериментальних досліджень можна зробити такі висновки:

- основні конструктивні характеристики матриці по різному впливають на густину пелет, виготовлених з опалого вологого листя клену:

збільшення кута входу біоматеріалу від 60° до 120° зменшує густину на 6 %, а збільшення довжини циліндричної її частини з 15 мм до 35 мм підвищує її на 3,5 %;

- виготовлення пелет з рослинних відходів і опалого листя низької вологості у відкритих матрицях пресового пристрою з вертикальним пуансоном, висота корпусу якого більше діаметра, не відбувається без попереднього змащення вхідної частини матриці;

- виготовлення пелет з рослинних відходів і опалого листя підвищеної вологості у відкритих матрицях зазначених пресових пристроїв здійснюється без ускладнень, але при висушуванні такі пелети значно зменшують густину і міцність та стають крихкими;

- для виготовлення пелет з рослинних відходів і опалого листя з густиною, відповідною євро стандарту, вологість сировини перед пресуванням доцільно підтримувати в межах 15 %...25 %.

4.2. Експериментальні дослідження виготовлення біопалива з композитів на основі рослинних відходів в закриту матрицю

Матеріали та обладнання для проведення експериментальних досліджень. Для виготовлення пелет з рослинних відходів, їх сумішей та композитів шляхом пресування у закриту матрицю, використовувалась сировина у вигляді соломи, тирси, листя опалого клену та дубу, побутові відходи ПЕТФ, що зазвичай використовуються для пакування води і газованих напоїв, а також буре вугілля [99]. Фракційний склад сировини, що застосовувалось в експериментах, наведено в таблиці 4.6.

Для проведення таких експериментальних досліджень застосовувалась універсальна випробувальна машина УІП-50 (рис. 4.1) і пресовий пристрій (рис. 4.19).

Таблиця 4.6 – Фракційний склад сировини, що використовувалась в експериментах

Сировина	Солома	Тирса	Листя дубу	ПЕТФ	Буре вугілля
Фракційний склад, мм	1...4	0,1...1,0	0,1...1,0	2...6	0,1...1,0 (80%) 1,0...3,0 (10%) 3,0...5,0 (10%)

Пресовий пристрій складається з пуансона 1, корпусу-матриці 2 (внутрішній діаметр 27 мм) та упору 3, що встановлюється в нижній частині корпусу-матриці.

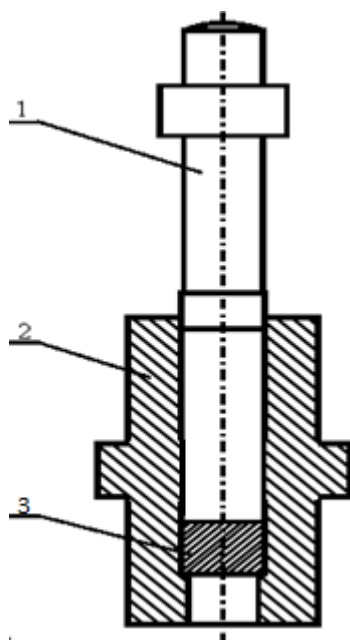


Рисунок 4.19 – Пресовий пристрій для виготовлення пелет в закритій матриці

Вологість сировини вимірювалась за стандартною методикою [95], густина зразків біопалива визначалась за допомогою електронних вагів з ціною поділу 1×10^{-5} кг. Фрактографії поверхонь пелет вивчалися з використанням мікроскопа МБС-9.

Для вивчення структури біопалива з листя клену використовували растровий електронний мікроскоп моделі РЕМ-106И виробництва Сумського ВАТ «SELMІ» (рис. 4.20).



Рисунок 4.20 – Растровий електронний мікроскоп моделі РЕМ-106И

Міцність виготовлених зразків оцінювалась шляхом вимірювання твердості їх поверхонь *НВ* за методом Бринеля на лабораторному гідравлічному пресі (рис. 4.21).



Рисунок 4.21 – Лабораторний прес для дослідження зразків біопалива на твердість

Методика експериментальних досліджень. Процес виготовлення пелет в закриту матрицю здійснювався наступним чином. В корпус-матрицю 2 пресового пристрою (рис. 4.19), що поміщався в робочу частину випробувальної машини, спочатку завантажувались рослинні відходи або композити, приготовлені окремо. Потім в неї встановлювався пуансон 1, включалася машина УІП-50 і здійснювалося стиснення сировини пуансоном з фіксацією значень зусилля пресування. Після досягнення планованого тиску пресування сировини і утворення сформованого зразка біопалива, навантаження знімалось, зразок виймався і визначались його густина та міцність, вивчалися та аналізувалися фрактографії поверхні.

Пресування біосировини зі здрібненого листа клену, відбувалося з метою виготовлення якісного біопалива та визначення оптимального тиску пресування утворених пелет без додавання домішок [96]. Для цього в циліндричну матрицю завантажували сировину та пресували її з різним ступенем деформації ϵ , яка дискретно змінювалася в межах від 41,9 % до 71,1%. За фіксованими значеннями зусилля пресування P та розрахунковими значеннями густини пелет ρ будували залежність $\rho = f(P)$.

Вимірювання твердості біопалива оцінювалось згідно рекомендацій, приведених в роботі [100]. Зразок біопалива, що випробувався, навантажувався дією сили 1000 Н на протязі 10 с через сталеву кульку діаметром 10 мм, встановлену на поверхні зразка. За діаметром відбитку лунки на поверхні після втискування кульки, визначали твердість зразка за виразом:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$

де: P – навантаження на поверхню зразка ; D – діаметр кульки; d – діаметр відбитку лунки.

Результати експериментальних досліджень виготовлення пелет з опалого листя клену. Залежність густини пелет від зусилля пресування наведена на рисунку 4.22, а залежність густини пелет від тиску пресування – на рисунку 4.23.

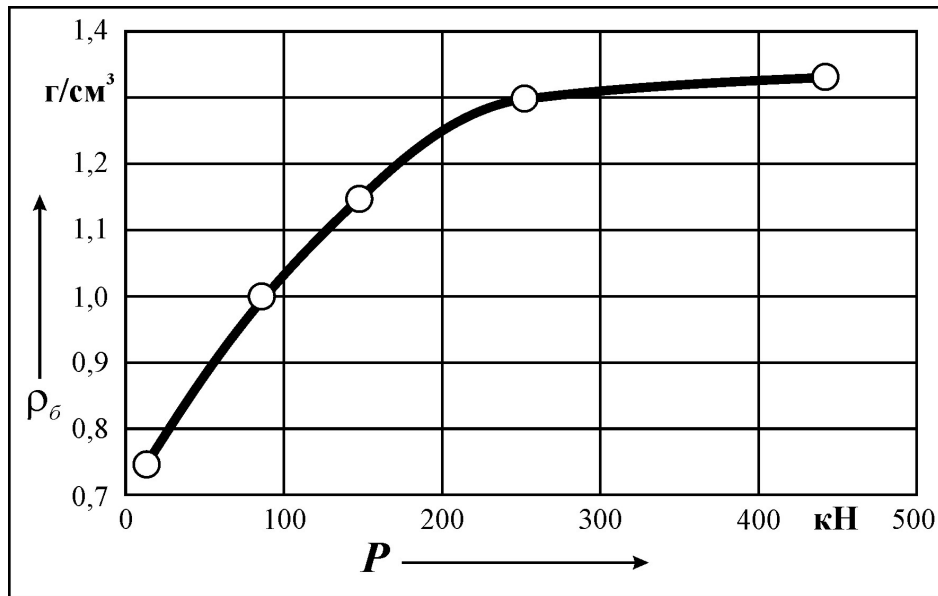


Рисунок 4.22 – Залежність густини пелет ρ_{δ} від зусилля пресування P

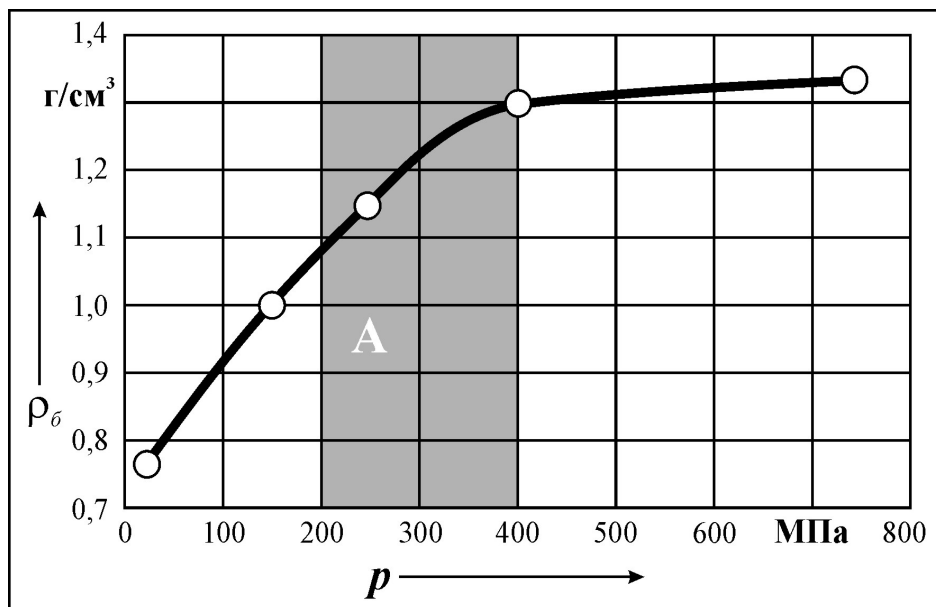


Рисунок 4.23 – Залежність густини пелет ρ_{δ} від тиску пресування p

Залежність зусилля пресування P здрібненого листя клену від величини деформації ε наведена на рисунку 4.24.

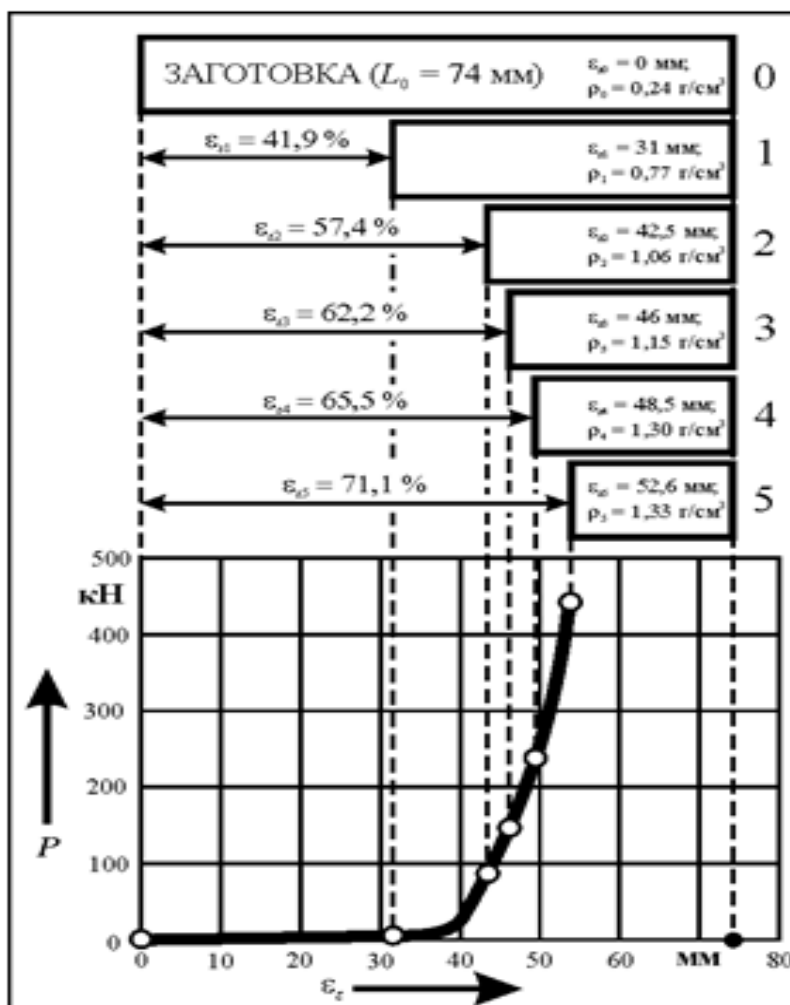


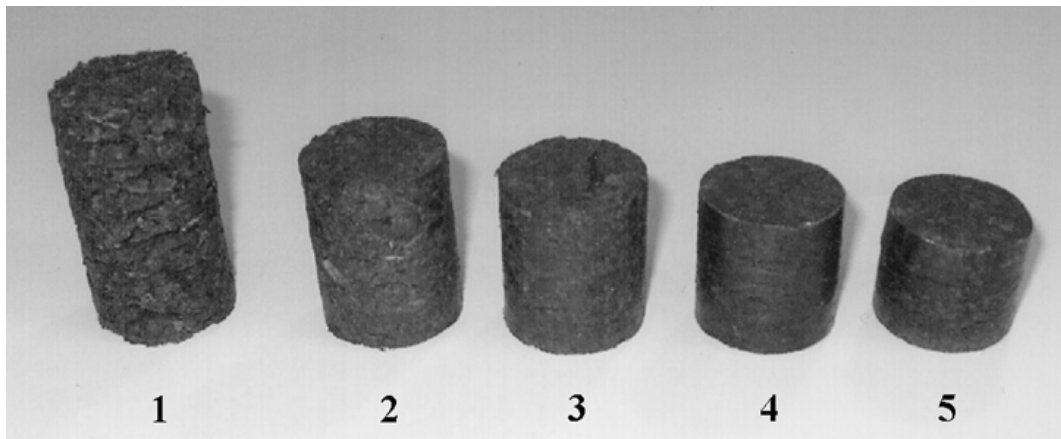
Рисунок 4.24 – Залежність зусилля пресування P здрібненого листа клену від величини деформації ϵ

Результати пресування біосировини з листа клену показали, що підвищувати зусилля пресування вище 440 кН недоцільно, оскільки густина пелет практично не підвищується вище 1,33 г/см³, що є найбільшою природною густиною дерева [101].

За результатами досліджень зусилля пресування, з урахуванням площі перерізу матриці (площі робочої поверхні під пуансоном), було визначено тиск пресування p та побудовано графічну залежність від нього густини пелет (рис. 4.23). Аналіз залежності показує, що на початку тиск пресування зростає поступово і рівномірно. Можна констатувати, що при пресуванні пелет з листа клену густина зразків знаходиться в лінійній

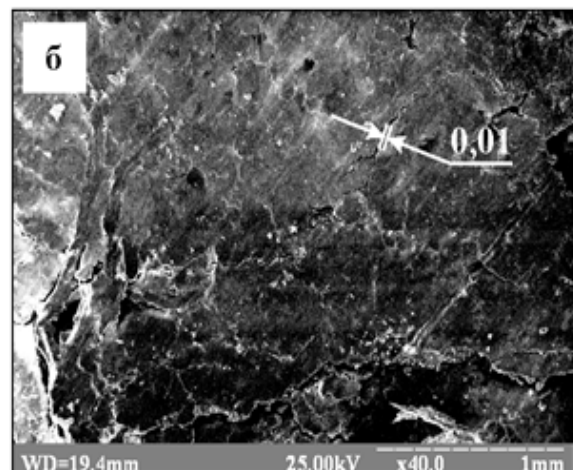
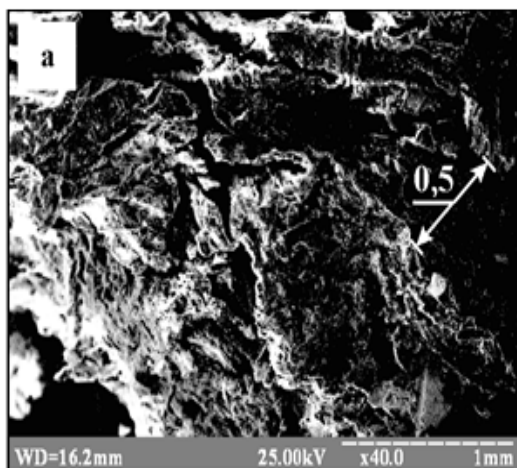
залежності від тиску пресування на інтервалі від 0 до ~ 300 МПа, а після 400 МПа густина асимптотично наближається до значення $1,33 \text{ г/см}^3$.

При визначенні зони оптимальних тисків пресування пелет із здрібненого листа клену (рис. 4.25), була вивчена структура виготовлених пелет з різною густиною. Фрактографії їх поверхонь наведено на рисунку (рис. 4.26).



1 – $\rho = 0,7 \text{ г/см}^3$; 2 – $\rho = 1,06 \text{ г/см}^3$; 3 – $\rho = 1,15 \text{ г/см}^3$; 4 – $\rho = 1,3 \text{ г/см}^3$; 5 – $\rho = 1,33 \text{ г/см}^3$

Рисунок 4.25 – Пелети зі здрібненого листа клену різної густини



а – зразок 1, $\rho = 0,7 \text{ г/см}^3$; б зразок 5, $\rho = 1,33 \text{ г/см}^3$

Рисунок 4.26 – Фрактографії поверхонь пелет різної густини зі здрібненого листа клену

Результати фрактографічних досліджень показали, що з підвищенням густини пелет відстань між часточками на поверхні зменшується у напрямку від 0,5 мм (рис. 4.26, а, зразок 1) до 0,01 мм (рис.

4.26 б, зразок 5), при зменшенні кількості наявних меж між часточками, що вказує на підвищення міцності останнього зразка. Крім того, результатами дослідження встановлено, що достатню міцність мають пелети із листя, густина яких є не менше $1,0 \text{ г/см}^3$, а верхня межа їх густини обумовлена раціональним витрачанням енергії на їх пресування та обмежена величиною $1,30 \text{ г/см}^3$.

Таким чином, оптимальний тиск пресування пелет з осіннього листя без додавання домішок лежить у межах від 200 до 400 МПа (рис. 4.23, зона А) та забезпечує отримання пелет густиною від 1,0 до $1,3 \text{ г/см}^3$.

Результати експериментальних досліджень виготовлення пелет з твердих рослинних відходів та їх композитів. Результати проведених експериментів [99] показали, що в пресовому пристрої з вертикальним пуансоном і закритою матрицею, при застосуванні біосировини з сумішей тирси і соломи, соломи, тирси і листя дубу вологістю 9...10% при тисках 263...350 МПа утворюються зразки біопалива, які мають гладку бокову поверхню (рис. 4.27) та щільну структуру (рис. 4.28, табл. 4.7). Значення густини, що відповідає вимогам європейським стандартам $\rho \geq 1,0 \text{ г/см}^3$ [49], досягається при тиску 263,2 МПа. Зростання тиску пресування з 87,7 до 350,9 МПа підвищує густину пелет з соломи на $\sim 27 \%$.

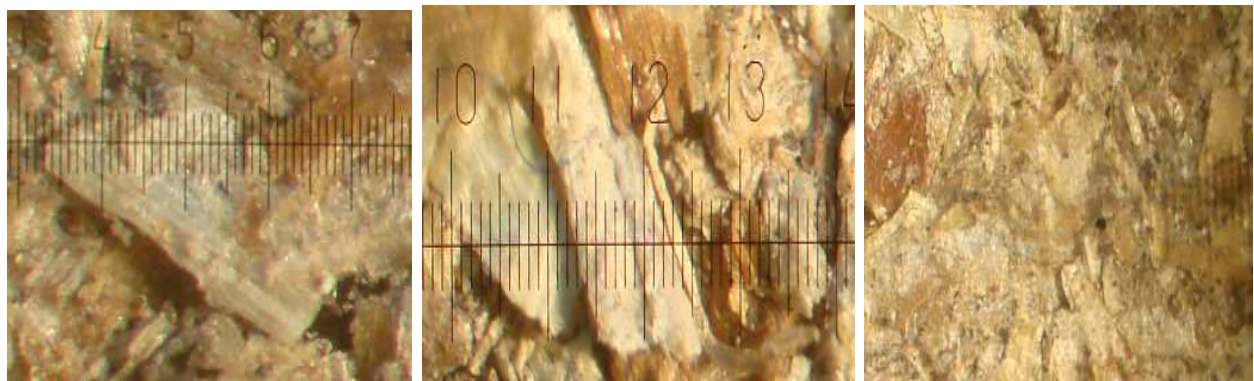


Рисунок 4.27 – Зразки пелет (діаметром 27мм і довжиною 30мм) з соломи (а), суміші тирси і соломи (б) та соломи, тирси і листя дубу (в), виготовлених при тиску 263,2 МПа

Таблиця 4.7 – Густина пелет, виготовлених з соломи та суміші рослинних відходів при різних тисках пресування

Солома		Солома+тирса (0,5/0,5)		Солома+тирса+листя (0,33/0,33/0,33)	
Тиск пресування, МПа	Густина пелет ρ , г/см ³	Тиск пресування, МПа	Густина пелет ρ , г/см ³	Тиск пресування, МПа	Густина пелет ρ , г/см ³
87,7	0,82	263,2	1,01	263,2	0,97
175,4	0,91	298,2	1,02	298,2	1,08
263,2	1,00				
350,9	1,12				

Фотографії поверхонь пелет, виготовлених з соломи, показують, що зростання тиску при пресуванні, підвищує однорідність структури (рис. 4.28)



а

б

в

а - тиск 87,7 МПа ($\rho=0,82$ г/см³); б – тиск 175,4 МПа ($\rho=0,91$ г/см³);
в – тиск 263,2 МПа ($\rho=1,01$ г/см³)

Рисунок 4.28 – Фотографії поверхонь зразків солом'яних пелет, утворених при різних тисках ($\times 1,5$)

Результати дослідів по визначенню твердості пелет з соломи, значення яких знаходяться в межах твердості таких порід дерев як сосна, модрина, клен [102], наведені у таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 –Твердість пелет з соломи, виготовлених при різних тисках пресування

Пелети, виготовлені при тиску, МПа	Середній діаметр лунки d , мм	Середня твердість пелет, HV	
		кгс/мм ²	МПа
175,4	6,78	2,29	22,5
263,2	6,52	2,55	25,0

Результати експериментальних досліджень утворення пелет з сумішей: солома + ПЕТФ, солома+буре вугілля, солома+тирса+листя дубу+буре вугілля приведені в таблиці 4.9, а загальний вигляд пелет показано на рис. 4.28 і 4.29.

Таблиця 4.9 – Густина пелет, виготовлених з суміші рослинних відходів та бурого вугілля або ПЕТФ при тиску пресування 298,2 МПа

Солома				Солома, тирса, листя дубу	
Вміст бурого вугілля, %	Густина пелет ρ , г/см ³	Вміст ПЕТФ, %	Густина пелет ρ , г/см ³	Вміст бурого вугілля, %	Густина пелет ρ , г/см ³
5	0,95	10	0,82	5	0,96
15	0,96	20	0,76	15	0,98
25	0,98	30	0,72	25	1,01
40	1,08	-	-	-	-
50	1,09	-	-	-	-

Збільшення вмісту ПЕТФ в соломі з 10 до 30 % знижує густину пелет і погіршує структуру їх поверхонь (табл. 4.9, рис. 4.28). Такий результат можна пояснити суттєво різними показниками коефіцієнта Пуассона соломи і ПЕТФ: відповідно 0,124 і 0,37...0,45 [40, 103], що викликає внутрішнє переміщення частинок сировини після зняття тиску пресування.



Рисунок 4.28 – Зразки пелет діаметром 27 мм, виготовлених з соломи і ПЕТФ, вміст якого складає 10% - (а), 20% - (б) і 30% - (в)

Зростання вмісту бурого вугілля від 5 до 50 % в суміші з соломною при пресуванні підвищує фізико-механічні характеристики пелет (таблиця 4.9, рис. 4.29).

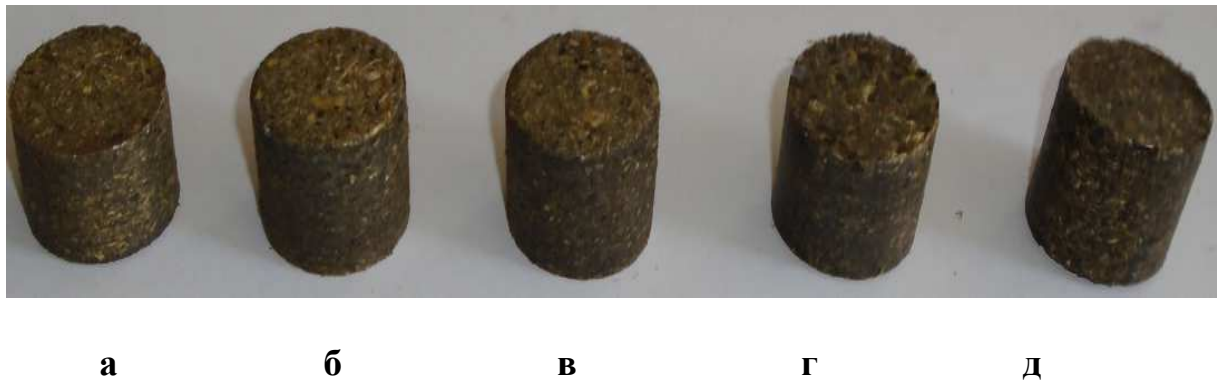


Рисунок 4.29 – Зразки пелет діаметром 27 мм, виготовлених з соломи і бурого вугілля, вміст якого складає: а – 5% ($\rho=0,95\text{г/см}^3$); б – 15% ($\rho=0,96\text{г/см}^3$); в – 25% ($\rho=0,98\text{г/см}^3$); г – 40% ($\rho=1,08\text{г/см}^3$); д – 50% ($\rho=1,09\text{г/см}^3$)

Аналогічні результати були одержані при виготовленні пелет на основі сумішей рослинних відходів соломи, тирси і опалого листя дубу з бурим вугіллям (таблиця 4.9, рис. 4.30).



Рисунок 4.30 – Зразки пелет діаметром 27 мм і висотою 30 мм, виготовлені з суміші композиту соломи, тирси, листя дубу (0,33/0,33/0,33) і бурого вугілля вмістом: 5% - (а), 15% - (б) і 25% - (в)

При опрацюванні технології порційного виготовлення пелет із соломи, які виготовлялись без виймання з матриці попередньо утворених зразків, було встановлено, що перший зразок, утворений з першої порції сировини мав найвищу густину $1,01\text{ г/см}^3$. Другий та третій зразки, утворені із сировини, що контактували з попередньо виготовленими пелетами, які знаходилися в матриці, мали нижчі значення: відповідно $0,93$ і $0,90\text{ г/см}^3$. Таку різницю густин можна пояснити пружними характеристиками соломи.

За результатами експериментальних досліджень виготовлення композитного палива на основі рослинних відходів в закриту матрицю можна зробити наступні висновки:

- на пресі з вертикальним розташуванням пуансона утворюються зразки біопалива задовільної якості з соломи, сумішей: тирси і соломи, соломи, тирси і листя дубу (вологість сировинних матеріалів знаходилась в межах 9...10%) при тисках 263...350 МПа. Густина вироблених при тиску пресування 263,2 МПа зразків досягає значення 1,0 г/см³, що відповідає вимогам стандартів, наприклад, ФРН, Швеції;

- з композиту зі складом солома+ПЕТФ при тиску 298 МПа утворюються пелети задовільної якості та з максимальною густиною 0,82 г/см³ при вмісту ПЕТФ 10%, яка зменшується до 0,72 г/см³ в пелетах з вмістом ПЕТФ 30%; з композиту рослинні відходи+буре вугілля утворюються пелети задовільної якості, густина яких при підвищенні вмісту бурого вугілля від 5% до 50 % збільшуються від 0,95 г/см³ до 1,09 г/см³;

- отримані результати можна розглядати як перший крок в розробці енергоефективної технології виготовлення біопалива з композитів на основі рослинних відходів на пресовому обладнанні з вертикальним пуансоном.

ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз стану сучасних технологій та конструктивних рішень обладнання для виготовлення паливних пелет і брикетів з твердих рослинних відходів.

2. Визначено, що на енергозатрати в процесі виготовлення пелет і брикетів з рослинної сировини та їх якість суттєво впливають такі основні параметри: фізико-механічні характеристики біосировини; створюваний на неї тиск і температура та конструктивні: геометричні розміри та компоновка матриці або камери пресування, шорсткість їх бічної поверхні.

3. Запропоновано методику оцінки пружних коефіцієнтів двохкомпонентного композитного біопалива на основі рослинних відходів за значеннями пружних коефіцієнтів складових компонентів.

4. Показано, що для виготовлення високоякісних пелет з густиною $\rho \geq 1000 \text{ кг/м}^3$ існують оптимальні значення фракційного складу, вологості, та температури сировини і тиску пресування, які залежать від виду твердих рослинних відходів.

5. При визначенні конструктивних параметрів фільтр матриці пресового пристрою для виготовлення пелет необхідно враховувати зв'язок коефіцієнту тертя між біосировиною та поверхнею філ'ери матриці і шорсткості обробки поверхні отвору формуючої головки з метою попередження заклинювання сировини в процесі роботи.

6. При обробці матриць для гранулювання і брикетування твердих біопалив доцільно використовувати спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД). Експериментально підтверджено, що при продуктивності процесу РОД М сталі Х12МФ в межах від 1472 до 3086 мм³/хв., досягаються значення шорсткості обробленої поверхні Ra від 6,3 до 20 мкм.

7. Розглянуто особливості процесу пелетоутворення у відкриту і

закритої матриці та проаналізовано математичні моделі процесу пелетоутворення у відкритій та закритій матрицях.

8. Розроблено методику та виконано експериментальні дослідження виготовлення пелет з рослинних відходів, зокрема з опалого листя, у відкритій матриці. Встановлено, що оптимальний тиск пресування пелет з осіннього листя без додавання домішок лежить у межах від 200 до 400 МПа та забезпечує отримання пелет густиною від 1,0 до 1,3 г/см³.

9. Основні конструктивні характеристики відкритої матриці по різному впливають на щільність пелет, виготовлених з опалого вологого листя клену: збільшення кута входу біоматеріалу від 60° до 120° зменшує густину на 6 %, а збільшення довжини циліндричної її частини з 15 мм до 35 мм підвищує густину на 3,5 %; для виготовлення пелет з композитів рослинних відходів і опалого листя зі щільністю, відповідною євростандарту, вологість сировини перед пресуванням доцільно підтримувати в межах 15 %...25 %.

10. Розроблено методику та виконано експериментальні дослідження виготовлення пелет поліпшеної якості з рослинних відходів та композитів на їх основі у пресовому пристрої з вертикальним пуансоном і закритою матрицею .

11. За результатами експериментальних досліджень виготовлення композитного палива на основі рослинних відходів в закриту матрицю на пресі з вертикальним розташуванням пуансона встановлено наступне:

- зразки біопалива задовільної якості з соломи, сумішей: тирси і соломи, соломи, тирси і листя дубу (вологість сировинних матеріалів знаходилась в межах 9...10%) утворюються при тисках 263...350 МПа. Густина вироблених при тиску пресування 263,2 МПа зразків досягає значення 1,0 г/см³, що відповідає вимогам стандартів, наприклад, ФРН, Швеції;

- з композиту зі складом солома+ПЕТФ при тиску 298 МПа утворюються пелети задовільної якості та з максимальною густиною 0,82

г/см³ при вмісту ПЕТФ 10%, яка зменшується до 0,72 г/см³ в пелетах з вмістом ПЕТФ 30%; з композиту рослинні відходи+буре вугілля утворюються пелети задовільної якості, густина яких при підвищенні вмісту бурого вугілля від 5% до 50 % збільшуються від 0,95 г/см³ до 1,09 г/см³.

12. За результатами проведених досліджень розроблено методичні рекомендації з визначення бази вихідних даних для розрахунків процесів та обладнання при виготовленні та використанні нових видів твердого палива з відходів рослинного походження та сумішей на їх основі в енергетичних установках, зокрема, в газогенераторах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шевчук В.Я. Екологізація енергетики: [Електронний ресурс]: навчальний посібник/ Шевчук В.Я., Білявський Г.О., Саталкін Ю.М., Навроцький В.М. – К.: Вища освіта, 2002. 111 с. – (Бібліотека КПІ)[SYS:000133273] — Режим доступу до пос.: www.library.kpi.ua/recs.../КМА02.000133273.html.
2. Альтернативна енергетика та ресурсоенергозбереження. [Електронний ресурс] / – Режим доступу до офіційного інтернет-порталу (Промислова екологія): <http://eco.com.ua>.
3. Гелетуха Г. Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні. Практичний посібник/За ред. Г. Гелетуха. – К.: «Поліграф плюс», 2015. – 72 с.
4. Лакида П.І. Енергетичний потенціал біомаси в Україні / [Лакида П.І., Гелетуха Г.Г., Васишин Р.Д., та ін.], відповід. наук. ред. д.с.-г.н., проф. П.І. Лакида; Навчально-науковий інститут лісового і садово-паркового господарст-ва НУБіП України. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2011. – 28 с. ISBN 9784966480064838.
5. Гелетуха Г.Г. Використання місцевих видів палива для виробництва енергії в Україні [Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Матвеев Ю.Б. та ін.] // Пром. теплотехніка. –2006. – № 2. – С. 85–93.
6. Технологія виробництва різних видів біопалива [Електронний ресурс]. «Біопаливо та котли України», 03 листопада 2012 – Режим доступу: <http://bio.ukrbio.com/ua/articles/2344/>.
7. Торгівля торішнім листям або екологічний бізнес [Електронний ресурс] / Великобританія, альтернативні джерела енергії.// 22 вересня 2008 року — Режим доступу: <http://www.eco-live.com.ua/content/blogs/torg-vlya-tor-shn-m-listyam-abo-ekolog-chnii-b-znes?page=8>.

8. Матвійчук А. С. Сумісне спалювання біомаси і вугілля: матеріали Наук.-техн. конф. [Енергетика майбутнього в Україні: Альтернативність, ефективність, безпека], (АР Крим, 11—13 жовт.), смт. Миколаївка, 2013, С. 64-65.

9. V. Karkania, E. Fanara, A. Zabaniotou, "Review of sustainable biomass pellets production – A study for agricultural residues pellets' market in Greece," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 3, pp. 1426–1436, April 2012.

10. Dian Andrianaand Tinton Dwi Atmaja. Alternative mixing scenarios and pretreatment manner to optimize wood fuel pellet. International Conferenceon Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA) Inna Garuda Hotel, Yogyakarta, Indonesia, 6 – 7 November 2012, pp. 21-26.

11. Клименко В.В. Газифікація твердих біопалив та обґрунтування конструкції газогенераторів для її провадження / В.В. Клименко, В.І. Кравченко // Конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: Збірник наукових праць КНТУ. – 2013. Вип. 43 (ч. II).- С. 113 – 119.

12. Тверде біопаливо: технологічні вимоги, властивості компонентів та технологія виробництва. [Електронний ресурс] Газета "Агробізнес сьогодні"№19(290) , 22 жовтня 2014, за ред. О. Гайденко, К.- : вид-во ТОВ "Прес-медіа" 2014./ Режим доступу: <http://www.agro-business.com.ua/ideii-i-trendy/2424-tverde-biopalyvo-hnologichni-vymogy-vlastyvosti-komponenttiv-ta-tekhnologiiia-vyrobnytstva.html>.

13. Древесные пеллеты / [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании «ЭкоБиоТех» – Режим доступу: <http://ecobiotech.com.ua>.

14. Производство пеллет [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании «Биоресурс Украина». – Режим доступа: <http://bioresource.com.ua>.

15. Производство топливных гранул (пеллет) [Электронный ресурс]: Завод по производству топливных гранул мощностью 1- 1,5 т/час

с рубительной машиной. — Режим доступа: http://www.projectservice.ru/ps/tovary_i_uslugi/pererabotka_otxodov_drevesiny/oborudovanie_dlja_proizvodstva_toplivnyx_granul_i_briketov/komplektnye_zavody_po_proizvodstvu_toplivnyx_granul_spiko_pskov/zavod_po_proizvodstvu_toplivnyx_granul_moshhnostju_1_15_tchas_s_rubitelnoy_mashinoy.

16. Соломорізка-подрібнювач соломи (1500-1800 кг/год). [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://bioekoprom.com.ua/katalog/izmelchiteli/solomarezki/solomarezka.izmelchitel_solomyi_drobilka_1500-1800_kg_chas/

17. Сільгосптехніка. Подрібнювач Tomahawk 505M, Київ. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://biznes-pro.ua/index.php?page=10&id=41645>.

18. Дробарка молоткова ДМ 2000. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://pellety.ub.ua/ua/goods/view/3579619/all/drobarka-molotkova-dm-2000/1>

19. Молотковая дробилка А1-ДМ2Р-55. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://belgorod.all.biz/molotkovaya-drobilka-a1-dm2r-55-g4540112#.WH4nh1OLTIU1>

20. Дробилка молотковая дековая 3 тонны в час [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://bio-nc.com/p27904468-drobilka-molotkovaya-dekovaya.html>.

21. Дезинтеграторы. [Электронный ресурс] : Desintegraator Tootmise OÜ - машиностроительное предприятие// — Режим доступа <http://desi.eu/index.php/ru/tooted/d-zin-gr-ri>.

22. Блок сушки опила. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rostehnogarrant.ru/produkt/granulirovanie-briketirovanie/4-kompleks-granulirovaniya-opila-shelukhi-do-800-kg-ch.html>

23. Сушилка аэродинамическая для опилок, торфа, соломы. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://zhytomyr.all.biz/sushilka-aerodinamicheskaya-dlya-opilok-torfa-g1363618#.WH4tcFOLTIU>

24. Сушильный комплекс барабанного типа АВМ 0-65. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://eko-teplo.biz/p23736073-sushilnyj-kompleks-barabannogo.html>.
25. Охладитель топливных гранул противоточный. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://agrovektor.by/physical_product/520665-ohladelitel-toplivnyh-granul-protivotochnyy.html
26. Просіювач гранул фракційний. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.ick.ua/ua/grantech/catalog/-grantech-Dlya-proizvodstva-granul-i-briketov-/Proseivatel/>.
27. Производство пеллет. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://namillion.com/proizvodstvo-pellet.html>
28. Классен П.В. Гранулирование: учебн. [для студ. вищ. учеб. зав.] / П.В. Классен, И.Г. Гришаев, И.П. Шомин. – М.: Из-во: "Химия" 1991. – 240 с.
29. Классен П.В. Основы техники гранулирования: учебн. [для студ. вищ. учеб. зав.] / П.В. Классен, И.Г. Гришаев: Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. – М.: Из-во: "Химия", 1982. – 272 с.
30. Осокин А.В. Анализ существующих способов и технологических средств для компактирования техногенных материалов / А. Осокин, М. Севостьянов. – Москва.: Из-во: [Научно-информационный издательский центр и редакция журнала "Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук"](#), №5, 2013, С. 89-93. ISSN: 2073-0071.
31. Риндюк, Д. В. Розробка методу визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів процесу гранулювання дисперсних матеріалів екструзією. [Текст]: автореф. дис...канд.тех.наук: 05.18.12 / НУХТ.– К., 2012. – 20 с.
32. Гранулятор с плоской матрицей КЛ600 (Украина), для пеллет. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://f-z.com.ua/mini-press-granuly>

33. Гранулятор фирмы Ижспецконтракт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://teplo.guru/kotly/tverdoplivnyye/granulyator-svoimi-rukami.html>

34. Запчасти матрицы и ролики на грануляторы ОГМ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://agrolain.ru/ads/zapchasti-matritsyi-i-roliki-na-granulyatoryi-ogm>

35. Клименко В.В. Результаты попередніх досліджень виготовлення паливних пелет з рослинних відходів. / Клименко В.В., Кравченко В.І., Старостін Ю.П. // 36. тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві. – Кіровоград: КНТУ, 2015, С. 45-46.

36. Сарана В.В. Багатокритеріальна оцінка сучасного обладнання для виготовлення паливних гранул і брикетів з відходів переробки сільськогосподарських культур і деревини / В.В. Сарана, М.М. Гудзенко, С.М.Кухарець // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія техніка та енергетика АПК. – К., 2010. – Вип. 144, ч. 4, С.190-197.

37. Блюм Я.Б. Новітні технології біоенергоконверсії: Монографія / Я.Б. Блюм, Г.Г. Плетуха, І.П. Григорюк, В.О. Дубровін, А.І. Ємець, Г.М. Забарний та інші – К: «Аграр Медіа Груп», 2010. – 326 с.

38. Гузь М.А. Разработка метода расчета высокоскоростного гранулятора окатывания для мелкодисперсных материалов: дисс. ... канд-та техн. наук. – М.: МИХМ, 1982. – 206 с.

39. Мюллер О.Д. Экспериментальное определение влияния на модуль Юнга давления прессования древесной гранулы. / Мюллер О.Д., Мелехов В.И., Герасимчук Д.Л., Ключин Н.М., Тюрикова Т.В. // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2015. № 3. С. 69-76.

40. Штефан Є.В. Дослідження структурно-механічних властивостей дисперсних матеріалів рослинного походження/ Штефан

Є.В., Риндюк Д.В., Таран О.В. — Вінниця // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. №10 т. 1 (58) 2012 р. с. 181-185.

41. 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.

42. Александров А.В. Основы теории упругости и пластичности [Текст] / А. В. Александров, В. Д. Потапов // – М.: Высшая школа, 1990. – 400 с.

43. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. учебн. [для студ. вищ. учеб. зав.]– М. Изд-во Моск. ун-та,1984. – 336 с.

44. Hashin Z., Shtrikman S. On some variational principles in anisotropic and nonhomogeneous elasticity. – J. Mech., Phys., Solids, 1962, 10, № 4, 335-342.

45. Carone MT, Pantaleo A, Pellerano A: Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L. Biomass Bioenergy 2011,35(1):402–410. 10.1016/j.biombioe.2010.08.052.

46. Abedin Zafari, Mohammad Hossein Kianmehr, Rahman Abdolazadeh. Modeling the effect of extrusion parameters on density of biomass pellet using artificial neural network. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture (2013). ISSN: 2195-3228.

47. Křitán P., Matúš M. Experimentálne skúšky lisovanie drevnej hmoty. In: Briketovanie a peletovanie 2007. Medzinárodný odborný seminár, Briketovani a peletovanie 2007: Strojnícka fakulta STU Bratislava, 2007, ISBN 978-80-227-3185-0, pp. 12-20.

48. Kott J. Technické a ekonomické aspekty výroby pelet z biomasy. In Briketovanie a peletovanie – sborník prednášok 2009. Briketovani a peletovanie : Strojnícka fakulta STU Bratislava, 2009, ISBN 978-80-227-3185-0, pp. 75-81.

49. P. Židková, O. Obdržálek, L. Kovář. The pelletising proces: the aspects that influence density of wood pellets. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada strojní. 2011. Roč. 57, č. 1, pp. 283-289.

50. Lam PS, Sokhansanj S, Bi X, Lim CJ, Naimi LJ, Hoque M, Mani S, Womac AR, Ye XP, Narayan S: Bulk density of wet and dry wheat straw and switchgrass particles. Appl Eng Agric 2008, 24: pp. 351–358.

51. Левко С. Результати експериментальних досліджень процесу ущільнення стеблових рослинних матеріалів / С. Левко — Львів : // [Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. : Агроінженерні дослідження](#). – 2013. – № 17. – С. 130-137.

52. Зотова Е. В. Аналитическое исследование параметров, определяющих технологию производства древесных пеллет. / Е. В. Зотова, А. О. Сафонов, А. Д. Платонов // Лесотехнический журнал, Древопереработка. Химические технологии, 1/2014, С. 127-132.

53. Сафонов А.О. Автоматизация управления прессом-гранулятором для производства пеллет из древесных отходов / А.О. Сафонов // [Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета](#)// Научный журнал КубГАУ. – 2011. – №74(10). С. 1-8.

54. Wolfgang Stelte, Jens K. Holm, Anand R. Sanadi, Søren Barsberg, Jesper Ahrenfeldt and Ulrik B. Henriksen. Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. Fuel. Volume 90, Issue 11, November 2011, pp. 3285–3290.

55. Боголицын, К.Г. Экологически безопасные технологии химической переработки древесины / К.Г. Боголицын, Т.Э. Скребец // Aims for future of engineering science: 5-th international forum, May 2-8, 2004: proceeding. – Paris (France), 2004. – pp. 475 – 478.

56. Штефан, Е. В. Исследование влияния температуры на процесс прессования дисперсных материалов / Е. В. Штефан, Д. В. Рындюк // — Х.

: Вестник Национального технического университета ХПИ. – 2010. – Вып. 65 : Химия, химическая технология и экология. - С. 114-118.

57. Green David W. Mechanical Properties of Wood / David W. Green, Jerrold E. Winandy, David E. Kretschmann // Wood handbook / David W. Green, Jerrold E. Winandy, David E. Kretschmann. – Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Products Laboratory, 1999. – Chapter 4. – pp. 4-1 – 4-45.

58. Булатов И.А. Разработка процесса прессового гранулирования мелкодисперсных сред на примере минеральных порошков и древесных отходов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08, 05.02.13 / И. А. Булатов. - М., 2012. - 19 с.

59. Елифанцев К. В. Выбор рациональных параметров наборной матрицы торфяной формующей машины для получения энергоплотного окускованного топлива [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / К. В. Елифанцев. - СПб., 2012. - 22 с.

60. Федоренчик, А. С. Определение параметров оборудования для производства пеллет [Determination of the equipment parameters for pellet production] / А. С. Федоренчик, Д. М. Гайдукевич // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды XI Международного евразийского симпозиума 20–23 сентября 2016 г. / [под научной ред. В. Г. Новоселова]; Минобрнауки России, Уральский государственный лесотехнический университет, Уральский лесной технопарк. – Екатеринбург, 2016 – С. 250–253.

61. Штефан Є.В. Визначення конструктивно-технологічних параметрів процесів переробки харчових матеріалів холодною екструзією / Є.В. Штефан, Ю.О. Заєць, Д.В. Риндюк // Комбікормова промисловість України. – № 5 (18). – 2006. – С. 16-20.

62. Samuelsson R. Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets / [R. Samuelsson, S.H. Larsson, M. Thyrel et all.] // Applied Energy. – 2012. – Vol. 99.– p.p. 109 – 115.

63. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.

64. Дерягин Б.В. Адгезия твердых тел : Монография / Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, В. П. Смилга - М.: Наука, АН СССР, Ин-т физ. Химии, 1973. - 278 с.

65. Штефан Є.В. Гранулювання дисперсних матеріалів в умовах контактного тертя з робочими органами машин / Є.В. Штефан, Д.В. Риндюк // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – № 52 (1094).– (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 167 – 173. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0821.

66. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента (планирование регрессионных экспериментов) / В.В. Федоров – М.: Наука, 1971. – 312 с.

67. Оболенская А.В. Практические работы по химии древесины и целлюлозы / [А.В. Оболенская, В.П. Щеголев, Г.Л. Аким и др.]. – М.: Лесная промышленность, 1965. – 441 с.

68. Сіса, О. Ф. Обробка електричною дугою матриць для брикетування / О. Ф. Сіса // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. - Кіровоград: КНТУ, 2015. - Вип. 45, ч. 1. - С. 302-308.

69. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: дис. ... доктора техн. наук: 05.03.07 / Носуленко Віктор Іванович. – Кіровоград, 1998. – 389 с.

70. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов электрической дугой / В.И. Носуленко, Г.М. Мещеряков // Электронная обработка материалов. – 1981. - № 1. – С.19-23.

71. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою /В.М. Боков – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс-ЛТД», 2002. – 300 с.

72. Новик Ф. С, Арсов Я. Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С Новик, Я. Б. Арсов. - М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. - 304 с.
73. Яцун С.С. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів /О.М. Царенко, Д.Г. Войтюк, В.М. Швайко та ін.; За ред. С.С. Яцуна. – К.: Мета, 2003. – 448с.
74. Хайліс, А.Ю. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів /Г.А. Хайліс, А.Ю. Горбовий та ін. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛДТУ, 1998. – 268с.
75. Штефан Е.В. Визначення експлуатаційних навантажень в елементах обладнання при виробництві паливних пеллет/ Е.В. Штефан, Д.В. Риндюк// Харків.- Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 59, С. 147 – 150.
76. Финдайзер, Б. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы / Б. Финдайзер, Э. Фридрих, В. Шатт. – М.: Металлургия, 1983. – 520 с.
77. Загиров Н.Н. Теория обработки металлов давлением /Н.Н.Загиров, Е.В.Иванов, В.П.Катрюк, В.Н.Баранов./ Конспект лекций- Красноярск: СФУ, 2007. - 217с.
78. Рыбин, Ю.Н. Теория уплотнения порошковых материалов: учебное пособие/ Ю.Н. Рыбин. – С.-Петербург: СБГТУ, 2002. – 109 с.
79. Попов А.Н. Исследование процесса производства древесных гранул с целью повышения эффективности их энергетического использования. дисерт. канд. техн. наук. /А.Н. Попов. - Архангельск, 2016. - 151с.
80. Исследование и разработка методов совершенствования технологического процесса получения гранулированного топлива из древесного сырья как возобновляемого источника энергии: отчет о науч.-исслед. работе по гос. контракту № 14.740.11.0097 от 08 сент. 2010 г. (промежуточный, этап № 4) / САФУ; рук. В.К. Любов. Архангельск, 2012. 150 с.

81. Николаевский В.Н. Механика насыщенных пористых сред / В.Н. Николаевский, К.С. Басинев, А.Т. Горбунов, Г.А. Зотов. – М.:Недра, 1970. – 339 с.

82. Нигматулин Р.И. Методы механики сплошной среды для описания многофазных смесей / Р.И. Нигматулин // ПММ. – 1999. – Т. 34. – № 6. – С. 1097-1112.

83. Штефан Е.В. Використання математичного моделювання при проектуванні вузла пресування гранулятора / Е.В.Штефан, Д.В. Риндюк// Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – № 31. – С. 191-200.

84. Штефан Є.В. Информационная технология проектирования технологического оборудования для механической обработки дисперсных материалов / Є.В. Штефан // Межд. период. сб. науч. тр. "Обработка дисперсных материалов и сред. Теория, исследования, технологии, оборудование". – Вып. 12. – Одесса: НПО "ВОТУМ", 2002. – С. 72-78.

85. Штефан Є.В. Математическое моделирование процессов механической обработки дисперсных материалов / Є.В. Штефан // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск "Хімія, хімічна технологія та екологія". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – № 25. – С. 23-28.

86. Риндюк Д.В. Розробка метода визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів преса-гранулятора / Д.В. Риндюк, Є.В. Штефан // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій // Міністерство освіти і науки України. – Одеса: 2006. – Вип. 28. – Т. 2. – С. 202-205.

87. Кегель К. Брикетирование бурого угля / К. Кегель. – М.: Углетехиздат, 1957. – 653 с.

88. Механическая модель уплотнения идеальных материалов: [Электронный ресурс]: Образовательный ресурс металлургической отрасли «steel-education» — Режим доступа: [http://steel-](http://steel-education.com)

education.org/content/razdel-232-mehanicheskaya-model-uplotneniya-idealnyh-materialov

89. Кучинскас З.М. Оборудование для сушки, гранулирования и брикетирования кормов / Кучинскас З.М. — М.: Агропромиздат, 1988. — 208 с.

90. Бальшин М.Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна / Бальшин М.Ю. — М.: Изд-во Металлургия, 1972. — 336 с.

91. Кунин Н.Ф. Работа прессования металлических порошков / Н.Ф. Кунин, Б.Д. Юрченко // Порошковая металлургия. М. — 1964.- №6, - С.1-11.

92. Определение плотности брикетов [Электронный ресурс]: Образовательный ресурс металлургической отрасли «steel-education» — Режим доступа: <http://steel-education.org/content/razdel-241-opredelenie-plotnosti-briketov>

93. Гильфанов М. Ф. Экспериментально-теоретическое исследование процесса получения топливных брикетов из отходов деревообрабатывающей промышленности / М. Ф. Гильфанов, В. Н. Башкиров, Л. Н. Герке, А. Н. Грачёв. // Вестник Казанского технологического университета. Из-во: Казанский национальный исследовательский технологический университет.- Казань: КТУ. — 2011. — №6. — С. 218-224. ISSN: 1998-7072.

94. A. Alevanau, I. Ahmed, A.K. Gupta, W. Yang, W. Blasiak, "Parameters of high temperature steam gasification of original and pulverised wood pellets," Fuel Processing Technology, vol. 92, no. 10, pp. 2068–2074, October 2011.

95. Тайц Е.М. Методы анализа и испытания углей. / Е. Тайц, И. Андреева — М., Недра, 1983. — 301 с.

96. Боков В. М., Попова М. І., Лисенко Р. С. Використання осіннього листя для виготовлення альтернативних видів палива / Боков В.

М., Попова М. І., Лисенко Р. С. // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Збірник наукових праць КНТУ – Випуск 26. – Кіровоград: КНТУ, 2013 – С. 231-241.

97. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.Б. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.Б. — М.: Наука, 1976, – 280 с.

98. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. Новик С, Я. Арсов – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. –304 с.

99. Експериментальна оцінка виготовлення твердого біопалива з композитів на основі рослинних відходів/ [Клименко В.В., Кравченко В.І., Кириченко А.М, Личук М.В., Солдатенко В.П.]. – К.: // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2016, № 3, С. 18-24.

100. Мединський В.С. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів / Мединський В.С. //Практикум лабораторних і практичних занять: навч. посіб. – Кіровоград: ПОЛІМЕД-Сервіс, 2006. – 208 с.

101. Гофман Ю. В. Законы, формулы, задачи физики. Справочник / Юрий Владимирович Гофман. – К.: Наукова думка, 1977. – 576 с.

102. Вінтонів І. С. Деревинознавство: навч. посіб. / І. С. Вінтонів [та ін.]; Український держ. лісотехнічний ун-т, Українська академія дизайну. — Л. : РВВ УкрДЛТУ, 2005 . — 256 с.

103. Основные типы сложных полиэфиров или аналогов ПЭТ материала. [Электронный ресурс]. Полимерный онлайн справочник «ПластЭксперт» — Режим доступа: <http://www.eplastic.ru/spravochnik/materiali/pet>.

ДОДАТКИ

Додаток А**РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПІДГОТОВКИ ТВЕРДИХ РОСЛИННИХ ВІДХОДІВ ДО ПРЕСУВАННЯ**

На енергозатрати в процесі виготовлення пелет і брикетів з рослинної сировини та їх якість суттєво впливають такі основні параметри: фізико-механічні характеристики біосировини; створюваний на неї тиск і температура та конструктивні: геометричні розміри та компоновка матриці або камери пресування, шорсткість їх бічної поверхні.

Рекомендації з вибору вологості біосировини перед пресуванням

Рекомендовані значення вологості для всіх видів рослинних відходів перед пресуванням знаходяться в межах від 6 до 15%. Такі значення є орієнтовними, оскільки процес пелетування та утворення якісного біопалива з різних видів рослинних відходів залежить від умов їх вирощування, особистих структурно-механічних властивостей, підготовки до пресування тощо. Зважаючи на вплив багатьох чинників, від яких залежать характеристики кожної біосировини перед пресуванням, оптимальні значення їх вологості для одержання високоякісного біопалива з мінімальними енерговитратами можуть бути визначені дослідним шляхом. Наприклад, для пелет, що виготовляються з соломи, рекомендовані значення вологості 8-12 %, а оптимальні значення більшості з їх видів перед пресуванням повинні складати $10 \pm 1\%$.

Для виготовлення пелет з композитів рослинних відходів і опалого листя з густиною, відповідною євростандарту, вологість сировини перед пресуванням доцільно підтримувати в межах 15 %...25 %.

Використання сировини з вологістю, що нижче оптимальних значень, призводить до погіршення агрегування частинок сировини і виготовлення біопалива низької густини і міцності.

Використання сировини з вологістю, що перевищує оптимальні значення, призводить до зниження якісних показників пелет, в тому числі енергетичної їх цінності або навіть до руйнування в процесі зберігання.

Фракційний склад

Виготовлення якісного біопалива з густиною $\geq 1000 \text{ кг/м}^3$ вимагає підготовки біосировини зі зменшеним фракційним складом ($\leq 2,0 \text{ мм}$). Зменшення фракційного складу, при застосуванні у технологічному ланцюжку виготовлення біопалива дезінтеграторів для мікроподрібнення сировини ($\leq 0,1 \text{ мм}$), дозволить у деяких випадках вилучити ланку процесу її сушіння перед пресуванням, що значно скорочує енерговитрати на виробництво палива та поліпшує пожежобезпечність. Але треба враховувати, що в залежності від характеристик початкової біосировини та умов її підготовки, не у всіх технологічних процесах можуть бути виключено процес сушіння, а надмірне подрібнення сировини вимагає додаткових затрат енергії, що призводить до зростання вартості біопалива. Крім того, на сьогодні відсутні переконливі дані про позитивний вплив мікроподрібнення на зменшення енергетичних показників пресового обладнання.

Рекомендації з вибору температури біоматеріалу

Оптимальна температура процесу пелетування таких рослинних відходів як лушпиння соняшника і соломи складає $90\text{-}100^\circ\text{C}$. Подальше підвищення температури сировини вище 100°C є недоцільним, оскільки майже не впливає на підвищення густини гранул, але підвищує енерговитрати на їх виготовлення.

Для деяких видів біосировини, таких як лушпиння гречки, висівки, стружка деревини, збільшення температури в прес-матриці до 150°C підвищує густину біопалива до значень євростандарту, що пояснюється розчиненням лігніну під впливом підвищення температури і відсутністю

утворенням водяної пари, що розриває пелети на виході з фільтр матриці. Але подальше підвищення температури призводить до зниження їх густини.

Для деяких видів рослинних відходів, наприклад деревинна тирса, температура при пелетоутворенні повинна бути понад 150 °С, за якою пелети набувають найбільшої густини і міцності. При цьому верхньою межею температури пресування є 250 °С, коли розпочинається реакція піролізу, тобто відбувається часткове розкладання біомаси. При нагріванні в діапазоні температур від 75 до 200 °С така біосировина і їй подібні послідовно переходять з сипкого середовища в умовно-пластичний стан. При цьому відбувається різке зниження питомих тисків пресування і виготовляється біопаливо з високою густиною і міцністю. З підвищенням температури від 100 °С густина пелет з такої сировини змінюється незначно і в середньому дорівнює 1300 кг/м³.

Безпосереднє нагрівання матриці дозволяє надати біосировині пластичних властивостей, забезпечить гладкість зовнішньої поверхні пелет і знизить енерговитрати процесу гранулювання.

Рекомендації з вибору тиску пресування біоматеріалу

Тиск пресування на дискових та циліндричних грануляторах

Для досягнення на грануляторах необхідних за євростандартами показниками значень густини пелет (1000 кг/м³) з біосировини, яка за фізико-механічними характеристикам подібна до лущиння соняшника, тиск пресування повинен бути не нижче 100 МПа. Збільшення тиску до 300 МПа незначно (до 1100 кг/м³) підвищує густину такого біопалива.

Для виготовлення біопалива, яке за фізико-механічними характеристикам подібне до соломи, з густиною 1000 кг/м³, тиск пресування повинен бути 125 МПа. Підвищення тиску пресування до 300 МПа також незначно підвищує густину пелет.

Тиск пресування на пресовому обладнанні з вертикальним пуансоном

При утворенні пелет з опалого листа клену в пресовому обладнанні з використанням відкритої матриці і вертикальним пуансоном мінімальний тиск пресування повинен становити 165 МПа.

При утворенні пелет з аналогічної біосировини в пресовому обладнанні з закритою матрицею, мінімальний тиск пресування, при якому виготовляється якісне, за європейськими стандартами біопаливо, повинен бути не менше 150 МПа. Для виготовлення пелет з такої біосировини густиною 1300 кг/м^3 , необхідно створювати тиск 400 МПа.

Для досягнення густини пелет 1000 кг/м^3 з використанням тирси, соломи, листа дубу та їх сумішей, необхідно створювати тиск не нижче 260 МПа.

Тиск 300 МПа забезпечує виготовлення якісних пелет ($\rho \approx 1000 \text{ кг/м}^3$) з суміші соломи і бурого вугілля, вміст якого може коливатись від 5 до 50%, а фракційний склад $0,1 \dots 1,0 \text{ мм}$ становить 80 %.

При аналогічному тиску (300 МПа) можуть виготовлятись пелети, що складаються з композиту соломи і ПЕТФ (фракційним складом $2 \dots 6 \text{ мм}$), з вмістом останнього від 10 до 20 %. При цьому густина таких композитів відповідною складає $0,86$ та $0,72 \text{ кг/м}^3$. Такі пелети переважно можуть використовуватись при газифікації у газогенераторах.

Оцінка пружних коефіцієнтів (модуля Юнга і коефіцієнта Пуассона) окремих видів рослинних відходів, що обумовлюють тиск пресування і його визначення, а також методика оцінки пружних коефіцієнтів двохкомпонентної композитної біосировини на основі рослинних відходів за значеннями пружних коефіцієнтів складових компонентів, можуть бути визначені за методикою, наведеною у підрозділі 2.1 другого розділу монографії.

Рекомендації з вибору конструкції матриці відкритого типу та пресового обладнання

Фільєра матриці обов'язково повинна мати конусну вхідну частину, калібрувальну (циліндричну) і вихідну частину зі зворотним конусом, поверхні яких мають достатньо низьку шорсткістю для оптимального опору проходження і стиснення біосировини.

Зміною форми вхідного конусу філ'єри матриці забезпечується збільшення або зменшення у філ'єрі тиску на біосировину. Кут конусу філ'єри матриці на вході сировини залежить від виду сировини та її фракційності, і повинен мати не більше 60 °. Так, для біосировини, що за характеристиками подібна до лушпиння согоняшника та деревної стружки, найбільша густина гранул досягається при використанні матриць з кутом вхідного конусу $\alpha = 45^\circ$.

Від довжини і шорсткості калібрувальної частини філ'єри матриці залежить якісні показники пелет (густина, міцність, гладкість поверхні) та величина енерговитрат пресового обладнання. На довжину калібрувальної частини матриці в основному впливає діаметр філ'єри, її шорсткість поверхні, вид рослинних відходів, їх вологість та тиск пресування. Орієнтовні значення довжини циліндричної частини 15...35 мм. Збільшення довжини каналів в матриці незначно підвищує щільність пелет.

Діаметр калібрувальної частини філ'єри (5...10 мм) залежить від фракційності біоматеріалу, необхідної продуктивності та потреб замовника.

Оптимальний діаметр філ'єри матриці для виготовлення пелет з біоматеріалу, який за фізико-механічними характеристиками наближений до лушпиння соняшника, складає 8 мм. Збільшення діаметру призводить до зменшення густини пелет, але підвищення продуктивності виготовлення біопалива. При зменшенні діаметра філ'єри від оптимального значення, одержується протилежний результат

При виборі конструктивних елементів філ'єри матриці для різних видів рослинних відходів необхідно враховувати відношення довжини калібрувальної її частини до конусної формуючої, а також довжини калібрувальної частини до її діаметра, що забезпечить виготовлення пелет високої якості.

Для зняття напруги стисненого біоматеріалу і остаточного формування пелет, що виключає їх руйнування або розшарування при виході з філ'єри, після циліндричної ділянки необхідно забезпечити в ній зону зі зворотним конусом.

Збільшення коефіцієнта тертя між сировиною та поверхнею каналу підвищує щільність пелет, але при цьому зростають енерговитрати на їх виготовлення.

Найнижчі енерговитрати при пелетоутворенні та найбільш якісні пелети виготовляються при проходженні біосировини у фільєрах матриць, шорсткість бічної поверхні яких не перевищують максимально допустимі значення, в залежності від виду рослинних відходів. Так, для біосировини, фізико-механічні характеристики яких подібні до лущиння соняшника, шорсткість поверхні фільєр не повинна перевищувати значення $Ra = 3,2$ мкм, а для біосировини, подібної стружки сосни – $6,3$ мкм. Збільшення шорсткості контактної поверхні філ'єри при мінімальних швидкостях руху сировини, призводить до збільшення коефіцієнта тертя ковзання.

Для обробки матриць при гранулюванні і брикетуванні твердих біопалив доцільно використовувати спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД). При такій обробці поверхні філ'єри матриці зі сталі Х12МФ досягають значення шорсткості Ra від $6,3$ до 20 мкм.

Діаметр пресувального ролика у пресі-грануляторі повинен бути не менше 180 мм. Збільшення діаметра пресувального ролика підвищує щільність пелет.

Зазор між пресувальним роликом та поверхнею матриці повинен складати 0,5...1,5 мм. Зменшення зазору між роликом та матрицею позитивно впливає на підвищення щільності виготовленого біопалива.

Рекомендації з визначення вихідних даних для розрахунків процесів та обладнання при використанні нових видів твердого палива з відходів рослинного походження та сумішей на їх основі в газогенераторах

Пелети з рослинних відходів, фізико-механічні характеристики яких подібні лушпинню соняшника, тирси деревини тощо і після згоряння мають низьку зольність, можуть ефективно застосовуватись в процесах газифікації твердого біопалива в газогенераторах для одержання синтез-газу.

Обладнання газогенераторів, в яких як біопаливо використовують пелети з рослинних відходів, що за характеристиками подібні соломі і після згоряння утворюють підвищений зольний залишок (до 3,5...6,0%), потребує певних конструктивних змін, у порівнянні зі стандартними варіантами. В цьому випадку в конструкції газогенераторів необхідно забезпечити умови для запобігання потрапляння великої кількості часточок золи до виробленого синтез-газу та своєчасного її виведення з установки.

Для підвищення ефективності використання біопалива на основі рослинних відходів при газифікації та в процесах спалювання, доречно забезпечити додавання до їх складу перед процесом виготовлення вуглецевмістких матеріалів. Так, вміст бурого вугілля з фракційним складом 0,1...1,0 мм (80%) може складати у пелетах на основі соломи, тирси і листя дубу від 5 до 50% (по масі). Пелети з таких композитів в процесах їх газифікації у газогенераторах можуть суттєво підвищити теплотворність синтез-газу. Крім того, варіюванням вмістом компонентів такого композитного палива та зміною його фракційного складу, можна виробляти синтез-газ із заданим хімічним складом.

Для забезпечення ефективної утилізації побутових відходів доцільно виготовляти біопаливо на основі рослинних відходів (зокрема соломи) з вмістом ПЕТФ фракцією 2...6 мм до 20%.

Переробка такого палива можлива в енергетичних установках шляхом його спалювання і утилізацією тепла, що утворюється при цьому. Однак така технологія утилізації є шкідлива для довкілля і в цьому випадку спалювання полімерного палива повинно здійснюватися при температурах не нижче 800...900 °С.

Замість шкідливої для екології термічної переробки такого біопалива шляхом спалювання, доцільно застосовувати процес його газифікації, який є більш високотехнологічний вид утилізації таких матеріалів. Застосування процесів газифікації біопалива з вмістом ПЕТФ, обладнання газогенераторних установок повинно передбачати очистку синтез-газу від полімерних та інших смол, що може бути забезпечено, наприклад, подвійним його відбором у двозонних конструкціях газогенераторів.

Додадок Б

Технічні характеристики подрібнювачів

Соломорізка-подрібнювач соломи (Компанія Біоекопром, Україна)

Технічні характеристики:

Продуктивність (залежно від діаметра отворів встановленого сита):

фракція до 5 мм - до 1200 кг / год;

фракція до 10-15 мм - до 1800 кг / год;

Завантажуваний пакунок: до 100 x 180 см або насипом;

Вологість сировини: до 25%;

Електропостачання - 3 x 380 В / 50 Гц.

Встановлена потужність електродвигуна: 18-30 кВт;

Подрібнювач Tomahawk 505M, (Київ)

Подрібнювач Tomahawk 505M, призначений для рівномірного подрібнення сухої соломи або сіна. Агрегується з трактором потужністю 70 к.с, а також передбачена робота в автономному режимі з електроприводом. Обертовий жолоб, з кутом повороту в 280 градусів дозволяє подавати подрібнену соломку у важко доступні, замкнуті ділянки в приміщенні.

Додаток В

Технічні характеристики дробарок

Дробарка молоткова ДМ 2000

Продуктивність (залежить від діаметру отвору сита), т/год	2-3
Діаметр ротора ,мм	538
Ширина дробильної камери, мм	356
Довжина транспортних трубопроводів, мм не більше : - всмоктувального - нагнітального	220 300
Діаметр транспортних трубопроводів, мм:	
- всмоктувального	250
- нагнітального	200x200
Габаритні розміри, мм	1420x1065x1117
Потужність електродвигуна, кВт	37
Частота обертання ротора, об/хв	1500
Кількість молотків, шт.	90
Маса, кг не більше	500

МОЛОТКОВА ДРОБАРКА А1-ДМ2Р-55

Дробарка молоткова призначена для подрібнення сировини. Виготовляється для внутрішнього ринку та експорту в країни з помірним кліматом.

Моделі молоткових дробарок:

Показники	Од. вимірювання	Тип			
		А1-ДМ2Р-55	А1-ДМ2Р-75	А1-ДМ2Р-110	А1-ДМ2Р-160
1. Продуктивність в залежності від необхідної фракційності	т/год	2,5-6,5	3,5-10,0	6,0-14,5	8,0-22,5
2. Сумарна встановлена потужність	кВт	55,55	75,55	110,55	160,55
3. Частота обертання ротора	об/хв	1500	1500	1500	1500
4. Окружна швидкість молотків ротора	м/с	91±3	91±3	91±3	91±3
5. Габаритні розміри: - довжина; - ширина; - висота	мм	1600 1370 2250	1650 1370 2250	1950 1370 2250	2350 1370 2250
6. Маса дробарки	кг	1440	1765	2290	2600
7. Витрата повітря на аспірацію	м³/год	2700	2700	3600	4200
8. Строк служби	років	8	8	8	8

**Дробарка молоткова 3 - МД55, (Компанія « Северная корона»
Україна)**

Продуктивність	3 тони /год
Фракція на виході (товщина х ширина)	до 0,5 мм х до 3 мм
Кількість молотків	120 шт.
Товщина молотка	6 мм
Розмір горловини вхідного отвору	150 х 491 мм
Товщина металу у ріжучій частині корпусу	20 мм
Потужність	55 кВт
Вологість перероблюваної сировини	до 80 %
Вивантаження готового матеріалу	шнекове
Габаритні розміри (довжина х висота х ширина)	2390(д)х1610(в)х1240(ш)

**Дезінтегратор ООО «НПП Сервис Пак» (Україна, Київська обл.,
м. Київ)**

Характеристика	Значення
Продуктивність, кг/год	до 300
Потужність електроприводу, кВт	11
Габаритні розміри, мм	680 х 725 х 680
Маса, кг	290
Ступінь подрібнення (регулюється)	віл 0,01 мкр до 3,5 мм

Технічні характеристики сушарок

Блок сушарки АВМ

Барабанна сушарка використовується для висушування сировини вологістю 50-75% до необхідної вологості 10-15%. При підвищенні початкової вологості сировини, продуктивність сушіння зменшується.

Продуктивність, кг/год	до 1200
Загальна потужність, кВт	29
Габарити, мм	7000x4000x5000
Загальна вага, кг	2000
Температура гарячого повітря, °С	160-180

Сушарка трубчаста HGJ , (Україна, ООО «Ньютерм», м. Донецьк)

Сушарка має котел (паливо — вугілля, деревні відходи), відцентровий вентилятор і двигун (4 кВт/5,5 кВт, 380 В).

Моделі трубчастих сушарок та характеристики

Сушарка трубчаста, модель	HGJ-I	HGJ-II
Продуктивність, кг/год	300-400	400-500
Потік повітря, °С	180-250	180-250
Розмір сировини, мм	3-5	3-5
Вологість сировини на вході, %	до 45	до 45
Вологість сировини на виході, %	8-12	8-12
Потужність вентилятора, кВт	4	5,5
Розмір сировини для топки, мм	<20	<20
Витрата сировини для топки, кг/год	10	20
Маса, кг	2000	3000
Розміри, м	9x0,85x2,2	10,5x0,85x2,5

Сушильний комплекс барабанного типу АВМ 0-65

Призначена для сушки соломи, тирси, торфу.

Продуктивність - 700 кг/год (зима); 1000 кг/год (літо).

Вологість висушеної сировини – від 5%;

Сушильний агент - топкові гази;

Паливо – тирса, дрова;

Витрата палива – 1,3-1,4 м³ тирси для виробництва 1 т біопалива;

Потужність – 23 кВт (без дробарки), 40 кВт (з дробаркою);

Габаритні розміри:

- Довжина: 12450 мм.
- Ширина: 6200 мм.
- Висота: 5600 мм.
- Маса: 6500 кг

Додаток Д

Технічні характеристики грануляторів

Гранулятор КЛ-600 (Україна)

Продуктивність - 500-600 кг/год;

Потужність - 38 кВт;

Вага – 1200 кг.

Гранулятор з плоскою матрицею 100-120 кг/год (Україна)

Споживана потужність	5,5 кВт
Напруга	380,0 В
Частота	50,0 Гц
Потужність двигуна преса	5,5 кВт
Вага	120,0 кг

Установки (КМЕС) з гранулятором і циліндричною матрицею серії GC-MZLH (ООО Хэнань Kingman M & E)

Модель	Потужність головного двигуна, (кВт)	Продуктивність, (т//год)	Потужність двигуна живильника, (кВт)	Потужність двигуна кондиціонера (кВт)	Діаметр матриці (мм)	Діаметр пелет (мм)
КМРМ 25	7.5*2	0.2-0.3	0.75+0.55	2.2	250	4-8
КМРМ 32	37	0.3-0.6	0.75+0.55	2.2	320	4-8
КМРМ 35	55	0.5-0.8	0.75+0.75	2.2	350	4-8
КМРМ 40	75	0.7-1.1	1.5+0.75	2.2	400	4-8
КМРМ 42	110	1.0-1.5	1.5+0.75	5.5	420	4-8
КМРМ 508	132/160	2.0-3.0	1.5+0.75	7.5	508	4-8

Гранулятор GRAND-200 (Україна)

Призначення	для сипких матеріалів
Тип двигуна	електродвигун
Вага	400 кг
Висота	1100 мм
Ширина	800 мм
Довжина	1300 мм

Гранулятор роликовий «Матриця -150»

Технічні характеристики:

Продуктивність, кг/год	80
Встановлена потужність, кВт	4,0
Діаметр пелет, мм	6-8
Напруга, В	220
Габарити, мм	950x400x800
Маса, кг	150

Гранулятор zlsr 300b (РФ)

Потужність, кВт	22
Продуктивність по комбікорму, кг/год	800
Продуктивність по тирсі, кг/год	300 – 600
Габаритні розміри, мм	1270*520*1070
Діаметр матриці, мм	300
Вага, кг	410

Гранулятор ОГМ-1,5 (*Україна, Дніпропетровська обл.,
Дніпропетровський район, с. Степове, вул. Ювілейна, 116*)

Продуктивність (при використанні лушпиння соняшника, тирси) - 1 т/год

Продуктивність (при використанні соломи) - 1...1,2 т/год

Тип – стаціонарний

Силовий привод – редуктор

Тип редуктора прес-гранулятора – 2-х ступеневий

Потужність двигуна – 75 кВт (1500 об/хв)

Монографія

**Клименко Василь Васильович,
Кравченко Володимир Іванович,
Боков Віктор Михайлович,
Гуцул Василь Іванович**

**ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИГОТОВЛЕННЯ БІОПАЛИВА З
РОСЛИННИХ ВІДХОДІВ ТА ЇХ КОМПОЗИТІВ**

Комп'ютерний набір, комп'ютерна графіка,
верстка и технічне оформлення: ***Кравченко В. І., Боков В. М., Гуцул В. І.***

Тиражування: *Каліч О.Г.*

Підп. до друку 1.04.2017. Формат 60х84/16. Папір офсетний. Гарнітура Таймс.

Друк: різнограф. Ум. друк. арк. 11. Тираж 100 шт. Заказ № 0169

Надруковано: ПП «Ексклюзив-Систем»

Свідоцтво держ. реєстру ДК№4470 від 17.01.2013р.

26006, м. Кіровоград, вул. Шевченка, 25

Тел./факс 0522 24-35-53

