**Сімаков О.О.**

аспірант

**Вінницький національний
аграрний університет****Simakov O.**

postgraduate student

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 631.362****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-3-17****СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ
РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПІДХОДІВ ФРАКЦІОНУВАННЯ
ЛИСТОСТЕБЛОВОЇ МАСИ В
КОРМОВИРОБНИЦТВІ**

У статті здійснено системний аналіз сучасного стану та перспектив розвитку технологічних підходів до фракціонування сухої листостеблової маси в кормовиробництві, спрямованих на виділення листової фракції як найбільш поживної складової рослинної сировини. Актуальність дослідження зумовлена високою питомою вартістю кормів у структурі собівартості продукції тваринництва, дефіцитом повноцінного кормового білка та значними втратами поживних речовин у традиційних технологіях переробки сіна і трав'яної маси.

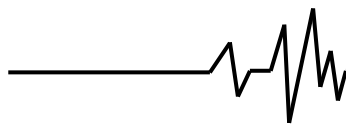
Метою роботи є узагальнення та інженерна оцінка існуючих технологій фракціонування сухої листостеблової маси, виявлення їхніх технологічних і конструктивних обмежень та обґрунтування доцільності розроблення нових технічних рішень для підвищення ефективності механічного відокремлення листя. Методологічною основою дослідження є системний і порівняльний аналіз наукових публікацій, патентних джерел і технічних описів машин, що реалізують аеродинамічні, обмолотні та очісувальні принципи розділення.

Показано, що ефективність процесу фракціонування визначається комплексом фізико-механічних та аеродинамічних властивостей листя і стебел, зокрема різницею їх міцності, крихкості, питомої маси та аеродинамічного опору. Встановлено, що аеродинамічні машини характеризуються підвищеною енергоємністю та значною залежністю якості розділення від вологості і гранулометричного складу матеріалу; обмолотні установки забезпечують інтенсивний механічний вплив, однак супроводжуються подрібненням стеблової фракції та засміченням листового продукту; очісувальні машини дозволяють отримувати листову фракцію високої якості, але мають обмежену продуктивність і недостатню повноту відокремлення.

На основі виявлених інженерних обмежень обґрунтовано доцільність розроблення машин очісувального типу з барабанним робочим органом та раціональною системою подачі й відведення фракцій, що створює передумови для підвищення ефективності та ресурсної ощадності технологій кормовиробництва.

Ключові слова: фракціонування, суха листостеблова маса, листові фракції, аеродинамічні машини, обмолотні машини, очісувальні машини, механічне відокремлення листя, очісувальний барабан, енергоємність процесу, якість фракціонування.

Вступ. Витрати кормів на одиницю Європи, що зумовлено, зокрема, недостатнім продукції тваринництва і птахівництва в Україні рівнем забезпеченості раціонів повноцінним залишаються одними з найвищих серед країн кормовим білком. За умов дефіциту білкових



компонентів фактичні витрати кормів перевищують зоотехнічні норми, що негативно впливає на ефективність виробництва тваринницької продукції. При цьому вартість кормів у структурі собівартості продукції тваринництва може досягати 80 %, що обумовлює необхідність підвищення їх поживної цінності та раціоналізації технологій кормоприготування [1].

У минулі роки для збагачення раціонів сільськогосподарських тварин широко використовувалося трав'яне та сінне борошно, виробництво якого базувалося на подрібненні та високотемпературному сушінні всієї листостеблової маси. Однак застосування енергоємних сушарок, значні витрати палива та електроенергії, а також необхідність використання хімічних стабілізаторів призвели до зростання собівартості продукції та поступового скорочення обсягів її виробництва. Крім того, спільне сушіння листя і стебел за високих температур супроводжується пересушуванням листової фракції, втратами поживних речовин, зміною кольору та погіршенням якості кінцевого продукту [1-2].

Водночас встановлено, що листя багаторічних кормових трав, зокрема люцерни та конюшини, істотно відрізняється від стеблової частини за хімічним складом. Листова фракція містить у 2–3 рази більше протеїну, основну кількість каротину та вітамінів і характеризується значно меншим умістом клітковини порівняно зі стеблами, що визначає її високу поживну цінність у годівлі різних видів сільськогосподарських тварин. Зазначені особливості зумовлюють доцільність розділення сухої листостеблової маси на листову і стеблову фракції з метою цільового використання

кожної з них [3].

У зв'язку з цим у практиці кормовиробництва розвиваються технології фракціонування листостеблової рослинної сировини, спрямовані на отримання високопоживної листової фракції. У наукових працях описано різні підходи до фракціонування, які реалізуються на різних стадіях технологічного процесу та ґрунтуються на аеродинамічних, механічних і комбінованих принципах розділення. Разом із тим аналіз цих технологій свідчить про наявність суттєвих обмежень, пов'язаних з високою енергоємністю процесів, складністю конструкцій обладнання, нестабільністю якості отримуваної листової фракції та недостатнім урахуванням фізико-механічних властивостей сировини [4].

З огляду на викладене, актуальним є проведення системного аналізу існуючих технологій фракціонування сухої листостеблової маси з метою виявлення їх технологічних та інженерних обмежень і обґрунтування необхідності розроблення нових технічних рішень, здатних забезпечити підвищення ефективності процесу та стабільну якість листової фракції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сухе фракціонування включає в себе наступні операції: скошування у валок, польове сушіння і подальше розділення сіна на листову та стеблову фракції (рис. 1.9). Листова фракція легко засвоюється і є джерелом білка і протеїну для жуйних тварин, в той час як стеблова фракція багата лігніном, окрім згодовування після подрібнення і волого-теплової обробки, може використовуватися на паливно-енергетичні цілі, зокрема, для виготовлення паливних брикетів [5].

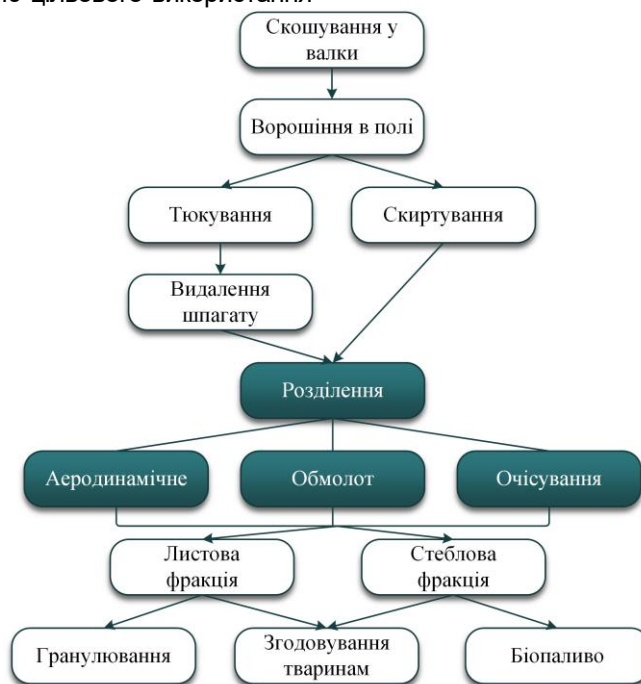
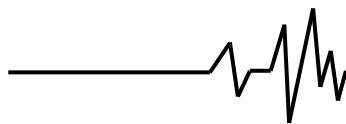


Рис. 1. Загальна технологічна схема фракціонування сухої листостеблової маси



Саме цей спосіб – використання люцерни на кормові і енергетичні цілі широко впроваджувався у США, де грубі стебла використовувалися як поновлюване джерело енергії.

Основою аеродинамічного фракціонування є різниця в опорі потоку повітря часток, які мають різну форму та масу [6].

На частку з площею міделевого перетину F_m у потоці повітря, швидкість якого становить V і щільність ρ_n діє сила аеродинамічного опору [18]

$$P = C_d \cdot F_m \cdot \frac{\rho_n \cdot V^2}{2}, \quad (1)$$

де C_d – коефіцієнт опору.

Таким чином частки, сила ваги, яких менша сили аеродинамічного опору діючого на них потоку повітря, виходять разом з ним. Як показує досвід, при сепаруванні сухої листостеблової маси у першу чергу це листова фракція.

Сепаратор з вертикальним повітряним потоком зигзагового типу (рис. 2) призначений для фракціонування сухої подрібненої листостеблової маси за аеродинамічними властивостями частинок. Принцип дії установки ґрунтується на використанні висхідного повітряного потоку та багаторазовій взаємодії матеріалу з повітряним середовищем у каналі з ламаною (зигзагоподібною) геометрією [7].



Рис. 2. Сепаратор з вертикальним повітряним потоком зигзагового типу

Конструктивно сепаратор складається з вертикального корпусу із системою нахилених перегородок, що формують зигзагоподібний канал, завантажувального патрубку, нижнього вивантажувального отвору для стеблової фракції та верхнього патрубка для відведення листової фракції разом із повітряним потоком у циклон або фільтр.

У процесі роботи легкі частинки з підвищеною парусністю (листова фракція) захоплюються повітряним потоком і виносяться у верхню частину апарата, тоді як важчі частинки

(стеблова фракція) осідають на перегородках і під дією сили тяжіння виводяться через нижній патрубок. Багатоступенева взаємодія частинок з повітряним потоком підвищує стабільність та ефективність процесу фракціонування порівняно з простими вертикальними аспіраційними шахтами.

Перевагами зигзагових сепараторів є компактність, відсутність рухомих робочих органів у зоні сепарації та можливість регулювання якості розділення зміною швидкості повітряного потоку. Недоліками залишаються необхідність попереднього подрібнення сировини, чутливість процесу до вологості матеріалу та підвищена енергоємність.

Машина OGK 1003-A (рис. 3) розроблена фірмою «Euro Prima d.o.o.» (Сербія) для відокремлення голівок суцвіття ромашки від стебел і пилу з продуктивністю 50–200 кг/год. у залежності від матеріалу, має масу 400 кг при довжині 2080 мм, ширині 1090 мм та висоті 2040 мм [8].

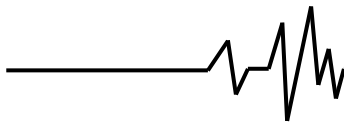
Вона виконана на мобільній платформі і складається з рами, на якій змонтований корпус з завантажувальним бункером, зверху якого розташовано перфорований екран, який встановлений над ротором діаметром 170 мм. Під корпусом розміщено похиле вібруюче решето з жолобками для виходу певної фракції. Обертання ротора і коливальний рух похилого решета приводиться в дію двигуном потужністю 1,1 кВт, встановленим на рамі.



Рис. 3. Машина для розділення зібраної сухої ромашки на стебла та суцвіття OGK 1003-A

Машина працює таким чином. Зібрану суху ромашку завантажують у приймальний бункер. З бункера маса потрапляє у зазор між ротором і ножами. Регулювання цього зазору дає можливість налаштування чистоти розділення. Оброблена маса потрапляє на спеціальне похиле решето з якого по жолобкам одержуються дві фракції; головки суцвіття і стебла з пилом.

Листообдирна машина типу Stem-Leaf Separator (рис. 4) призначена для відокремлення листової фракції від стебел сухої люцерни та інших кормових трав з використанням механічного впливу. Подібні установки застосовуються у



спеціалізованих технологічних ліній переробки сухої люцерни [9].



Рис. 4. Листообдирна машина типу Stem–Leaf Separator для відокремлення листової фракції від стебел сухої люцерни

Конструктивно машина складається з подаючого пристрою, робочої камери з обертовими валами або барабанами та системи вивантаження фракцій. Робочі органи забезпечують деформацію та ламання стебел з одночасним обдиранням листя, що ґрунтується на різниці міцності між листовою та стебловою частинами рослин.

У процесі роботи сухої люцерну подають у робочу камеру, де під дією механічного стискання, тертя та ударів відбувається руйнування зв'язку листя зі стеблами. Листова фракція відокремлюється та виводиться окремо, тоді як стеблова частина спрямовується на подальше використання або переробку. Установки цього типу характеризуються спрямованістю на обробку люцерни та обмеженою універсальністю щодо інших видів сировини.

Машина для фракціонування сіна Rebler LGU 200 (рис. 5) шляхом очісування листової складової, яка виробляється фірмою «Euro Prima d.o.o.», виконана пересувною і складається з рами, встановленої на колесах. На рамі закріплено корпус, у верхній частині якого розташовано приймально-завантажувальний бункер, під яким розташовані сепараційні барабани. Привод механізмів фракціонера виконується від електромережі [10].



Рис. 5. Машина для відокремлення листової фракції від стебел сухої листостеблової маси Rebler LGU 200

Установка виконана на мобільній платформі та складається з рами, на якій змонтовано корпус із завантажувальним бункером, усередині якого розташований обмолотний ротор. Ротор приводиться в дію електродвигуном, установленим на рамі машини. Оброблена маса виводиться з робочої камери та спрямовується на подальше фракціонування.

У процесі роботи сухої листостеблової масу завантажують у приймальний бункер, звідки вона подається до обмолотного ротора. Під дією механічних ударів та тертя відбувається відокремлення листя від стебел. Отримана суміш листової та стеблової фракцій потребує подальшого розділення на сепараційних пристроях [11].

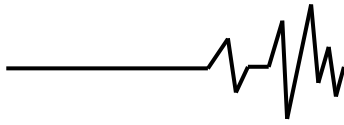
Проведений аналіз показав, що аеродинамічні, обмолотні та очісувальні машини для фракціонування сухої листостеблової маси реалізують різні фізичні механізми розділення, однак їх ефективність істотно обмежується неврахуванням комплексу фізико-механічних властивостей сировини, зокрема різниці міцності, гнучкості, крихкості та аеродинамічної поведінки листя і стебел.

Загальною проблемою для всіх розглянутих типів машин [6-12] є відсутність адаптивності робочих органів до змінних властивостей сухої листостеблової маси, що зумовлює компроміс між якістю фракціонування, продуктивністю та енергоємністю. У зв'язку з цим подальший розвиток технічних засобів доцільно спрямувати на створення комбінованих машин, у яких поєднуються дозований механічний вплив, аеродинамічне розділення та кероване фракціонування, з можливістю регулювання параметрів процесу залежно від властивостей сировини.

Реалізація зазначених інженерних підходів створює передумови для розроблення нових типів машин, здатних забезпечити стабільне одержання високоякісної листової фракції з мінімальними втратами поживних речовин та зниженими енерговитратами, що є ключовою вимогою сучасних технологій кормовиробництва.

Метою дослідження є формування підґрунтя до підвищення ефективності кормовиробництва шляхом обґрунтування інженерного підходу до фракціонування сухої листостеблової маси, що базується на поєднанні керованого механічного впливу та раціонально підібраних фізичних принципів розділення, з урахуванням фізико-механічних властивостей сировини.

Матеріали і методи. Матеріалами дослідження слугували наукові публікації, патентні джерела, технічні описи машин і технологічних ліній, а також нормативно-



довідкові матеріали, присвячені процесам фракціонування сухої листостеблової маси. У роботі проаналізовано технічні рішення, що реалізують аеродинамічні, обмолотні та очісувальні принципи відокремлення листової фракції, зокрема установки для пневматичної сепарації, обмолотні машини та листообдирні апарати, застосовувані у технологіях переробки кормових трав.

Методологічною основою дослідження є системний аналіз технологічних процесів фракціонування, що включав класифікацію машин за фізичним принципом дії, конструктивною схемою та характером взаємодії робочих органів із сировиною. Оцінювання ефективності технічних рішень здійснювали за узагальненими інженерними критеріями, зокрема за якістю відокремлення листової фракції, ступенем її засмічення стебловими частками, рівнем механічного руйнування матеріалу, енергоємністю процесу та адаптивністю машин до змінних фізико-механічних властивостей сировини.

Для аналізу технологічних обмежень використовували порівняльний метод [14], що передбачав зіставлення принципів роботи, конструктивних особливостей і режимних параметрів машин різних типів. Узагальнення результатів виконували шляхом логіко-інженерного аналізу, який дозволив виявити спільні недоліки існуючих технічних рішень та сформулювати напрями їх подальшого вдосконалення. Отримані результати використано для обґрунтування доцільності розроблення нових технічних рішень у сфері фракціонування сухої листостеблової маси.

Основні результати дослідження. Для інженерної оцінки ефективності різних технологій фракціонування слід враховувати такі критерії якості процесу:

Чистота листової фракції – вміст стеблових домішок у відібраному листі. Чим менше фрагментів стебел у листовому продукті, тим вища чистота. Очісувальні машини забезпечують найкращу чистоту (лічена частка сторонніх домішок), тоді як при обмолоті чистота нижча через попадання подрібнених стебел [12].

Енергоємність процесу – питома витрата енергії на відокремлення фракцій. Важливо мінімізувати споживану потужність на одиницю продуктивності. Обмолотні та очісувальні установки характеризуються низькою енергоємністю (достатньо кількох кВт на тону сировини), тоді як аеродинамічні системи потребують більше енергії на привод вентиляторів і повітряних потоків [15].

Пошкодження матеріалу – ступінь руйнування листків і стебел у процесі. Надмірне подрібнення листя небажане, оскільки призводить до втрати поживних речовин (у вигляді пилу) і ускладнює просівання.

Аеродинамічні та очісувальні методи майже не пошкоджують структуру листків (листя відділяються цілими), тоді як обмолот спричиняє значне дроблення як листя, так і стебел [8-13].

Засміченість фракцій – наявність небажаних домішок (пилу, землі, сторонніх включень) у кінцевих продуктах. Технологія фракціонування має забезпечувати мінімальну засміченість, що досягається як шляхом бережного поводження з матеріалом, так і використанням очищувальних пристроїв (решет, аспіраторів). У практиці очісування отримують майже чисту листову масу без подрібнених домішок, натомість після обмолоту листові фракції часто містять дрібні рештки стебел і пил.

Аналіз показує, що жоден з існуючих типів машин не повною мірою задовольняє всі критерії якості одночасно при достатній продуктивності. Аеродинамічні установки дають неналежну продуктивність і потребують складної техніки, обмолотні – грішать на чистоту і цілісність листя, очісувальні – забезпечують високоякісний продукт, але малопродуктивні. Це свідчить про необхідність розробки нового технічного рішення, яке поєднає переваги зазначених методів [16].

Логічним напрямком удосконалення є створення нової фракційної машини з очісувальним барабаном як ключовим робочим органом для механічного відокремлення листя. Така машина повинна забезпечити дбайливе очісування, зберігаючи переваги високої чистоти листків та низької енергоємності, але усунути недоліки нинішніх конструкцій щодо продуктивності.

Функціональна логіка роботи нової установки полягає в наступному: спочатку рівномірно подається вихідна суха листостеблова маса (через завантажувальний вузол), далі матеріал проходить через зону дії очісувального барабана, який вибиває або висіює листя зі стебел. Відірвані листки негайно відводяться від робочої зони – для цього передбачено сепарувальний модуль. Наприклад, під барабаном можна розташувати вібраційне решето або аспіраційну камеру, які розділяють потік: листові фракції просіюються або відсмоктуються окремо, а оголені стебла транспортуються в інший вихід. Це рішення дозволить уникнути скупчення маси на решеті та збільшити повноту відбору листя (раніше відокремлені листки не будуть змішуватися зі стеблами).

Конструктивно машина матиме такі основні вузли (рис. 6): приймальний бункер з дозатором подачі, очісувальний барабан (з контропорною решіткою або стрічкою для притискання маси), пристрій сепарації листя (решето із вібрацією чи повітряний сепаратор) та системи виведення розділених фракцій у відповідні накопичувачі.



Рис. 6. Принципова схема фракційної машини з очісувальним барабаном

Запропонована схема поєднує очісування як делікатний спосіб відокремлення листя та додаткову сепарацію для підвищення чистоти й повноти відбору. Очікується, що нова машина з очісувальним барабаном зможе забезпечити майже бездомішкову листову фракцію високої якості, звести до мінімуму пошкодження рослинного матеріалу і втрати листя, водночас підвищивши продуктивність процесу. Це стане можливим завдяки оптимізованій конструкції барабанного робочого органу (раціональний профіль гребенів, регульований зазор між барабаном і притискною поверхнею) та ефективній системі відбору продуктів (комбінації решіт і повітряного потоку). Таким чином, інженерно обґрунтована модернізація фракціонуальної техніки – створення машини барабанного очісувального типу – є перспективним рішенням, що усуває виявлені недоліки існуючих методів і задовольняє критерії якості фракціонування сухої листостеблової маси.

Висновки. Проведений аналіз показав, що існуючі технології фракціонування сухої листостеблової маси, які реалізуються в аеродинамічних, обмолотних та очісувальних машинах, не забезпечують одночасного досягнення високої якості листової фракції, стабільності процесу та енергоефективності за змінних фізико-механічних властивостей сировини.

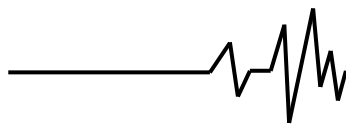
Встановлено, що аеродинамічні машини характеризуються підвищеною енергоемністю та чутливістю до гранулометричного складу і вологості матеріалу, обмолотні — значним руйнуванням стеблової фракції та засміченням листового продукту, тоді як очісувальні машини, забезпечуючи найвищу якість листя, мають обмежену продуктивність і недостатню повноту відокремлення.

Спільним інженерним недоліком усіх розглянутих типів машин є відсутність адаптації робочих органів до комплексу фізико-механічних властивостей сухої листостеблової маси, що зумовлює компроміс між якістю фракціонування, продуктивністю та енерговитратами.

На підставі узагальнення результатів обґрунтовано доцільність розроблення нових технічних рішень для механічного відокремлення листя, перспективним напрямом яких є створення машин очісувального типу з барабанним робочим органом та раціональною системою подачі й відведення фракцій, що створює передумови для підвищення якості листової фракції та зниження енергоемності процесу.

Список використаних джерел

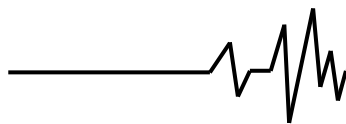
1. Спірін А.В., Твердохліб І.В., Купчук І.М., Побережець Ю.М. Обґрунтування енергоефективних режимів процесу досушування продуктів фракційної переробки люцерни. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 2 (113). С. 142–151.
2. Domokos-Szabolcsy E., Yavuz S.R., Picoli E., Fari M.G. Green biomass-based protein for sustainable feed and food supply. *Life*. 2023. Vol. 13, No. 2. Art. 307. DOI: 10.3390/life13020307.
3. Domokos-Szabolcsy E., Elhawat N., Domingos G. J., Kovacs Z., Koroknai J., Bodo E., Fari M. G. Comparison of wet fractionation methods for processing green biomass. *Foods*. 2022. Vol. 11, No. 16. Art. 2418. DOI: 10.3390/foods11162418.
4. Shinnors K.J., Binversie B.N., Muck R.E. Harvest fractionation of alfalfa. *Transactions of the ASABE*. 2007. Vol. 50, No. 3. P. 713–718.
5. Kaas A., Mütze T., Peuker U.A. Review on zigzag air classifiers. *Processes*. 2022. Vol. 10, No. 4. Art. 764. DOI: 10.3390/pr10040764.
6. Bulgakov V., Nikolaenko S., Holovach I., Adamchuk V., Ivanovs S., Olt J. Theory of grain mixture particle motion during aspiration separation. *Agronomy Research*. 2020. Vol. 18, No. 1. P. 18–37. DOI: 10.15159/ar.20.057.
7. Mykhailov Y., Zadosna N., Postnikova M., Pedchenko H., Khmelovskiy V., Bondar M., Ionichev A., Kozdęba M., Tomaszewska-Górecka W. Energy assessment of the pneumatic sieve separator for agricultural crops. *Agricultural Engineering*. 2021. Vol. 25, No.



1. P. 147–155. DOI: 10.2478/agriceng-2021-0012.
8. Adapa P.K., Schoenau G.J., Arinze E.A., Sokhansanj S. Fractionation of alfalfa into leaves and stems using a rotary drum dryer. *Biosystems Engineering*. 2005. Vol. 91, No. 4. P. 455–463.
9. Moiceanu G., Paraschiv G., Voicu G., Dinca M., Negoita O., Chitoiu M., Tudor P. Energy consumption at size reduction of lignocellulosic biomass for bioenergy. *Sustainability*. 2019. Vol. 11, No. 9. Art. 2477. DOI: 10.3390/su11092477.
10. Gomes T.L.C., Lourenço G.A., Ataíde C.H., Duarte C.R. Biomass feeding in a dilute pneumatic conveying system. *Powder Technology*. 2021. Vol. 391. P. 321–333. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.06.020.
11. Liebhardt P., Maxa J., Bernhardt H., Aulrich K., Thurner S. Comparison of a conventional harvesting technique in alfalfa and red clover with a leaf stripping technique. *Agronomy*. 2022. Vol. 12, No. 6. Art. 1408. DOI: 10.3390/agronomy12061408.
12. Bakum M.V., Krekot M.M., Abduev M.M., Maiboroda M.M. Results of research of a pneumatic separator for additional sorting of safflower seed, *Visnyk of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*. 2019. Iss. 198. P. 74–77.
13. Bredykhin V., Pak A., Gurskyi P., Denisenko S., Bredykhina K. Improving the mechanical and mathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 4, No. 1(112). P. 54–60. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.236938.
14. Alade J., Bada S. O., Schmitz W. Computer-aided design and fabrication of a dry wind-sifter separator. *ACS Omega*. 2021. Vol. 6, No. 31. P. 20309–20320. DOI: 10.1021/acsomega.1c02192.
15. Tishchenko L., Kharchenko S., Bredykhin V., Tsurkan O. Identification of grain particle velocity through vibrating sieves. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 2, No. 7(80). P. 63–69.
16. Ukrainian agriculture: promoting resilience in the face of war : report. Rome : FAO, 2024. URL: <https://fscluster.org/ukraine/document/ukrainian-agriculture-promoting> (дата звернення: 22.11.2025).
- Picoli, E., Fari, M.G. (2023). Green biomass-based protein for sustainable feed and food supply. *Life*. Vol. 13, No. 2. Art. 307. DOI: 10.3390/life13020307. [in English].
3. Domokos-Szabolcsy, E., Elhawat, N., Domingos, G.J., Kovacs, Z., Koroknai, J., Bodo, E., Fari, M.G. (2022). Comparison of wet fractionation methods for processing green biomass. *Foods*. Vol. 11, No. 16. Art. 2418. DOI: 10.3390/foods11162418. [in English].
4. Shinnors, K.J., Binversie, B.N., Muck, R.E. (2007). Harvest fractionation of alfalfa. *Transactions of the ASABE*. Vol. 50, No. 3. P. 713–718. [in English].
5. Kaas, A., Mütze, T., Peuker, U. A. (2022). Review on zigzag air classifiers. *Processes*. Vol. 10, No. 4. Art. 764. DOI: 10.3390/pr10040764. [in English].
6. Bulgakov, V., Nikolaenko, S., Holovach, I., Adamchuk, V., Ivanovs, S., Olt, J. (2020). Theory of grain mixture particle motion during aspiration separation. *Agronomy Research*. Vol. 18, No. 1. P. 18–37. DOI: 10.15159/ar.20.057. [in English].
7. Mykhailov, Y., Zadosna, N., Postnikova, M., Pedchenko, H., Khmelovskiy, V., Bondar, M., Ionichev, A., Kozdęba, M., Tomaszewska-Górecka, W. (2021). Energy assessment of the pneumatic sieve separator for agricultural crops. *Agricultural Engineering*. Vol. 25, No. 1. P. 147–155. DOI: 10.2478/agriceng-2021-0012. [in English].
8. Adapa, P.K., Schoenau, G.J., Arinze, E.A., Sokhansanj, S. (2005). Fractionation of alfalfa into leaves and stems using a rotary drum dryer. *Biosystems Engineering*. Vol. 91, No. 4. P. 455–463. [in English].
9. Moiceanu, G., Paraschiv, G., Voicu, G., Dinca, M., Negoita, O., Chitoiu, M., Tudor, P. (2019). Energy consumption at size reduction of lignocellulosic biomass for bioenergy. *Sustainability*. Vol. 11, No. 9. Art. 2477. DOI: 10.3390/su11092477. [in English].
10. Gomes, T.L.C., Lourenço, G.A., Ataíde, C.H., Duarte, C.R. (2021). Biomass feeding in a dilute pneumatic conveying system. *Powder Technology*. Vol. 391. P. 321–333. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.06.020. [in English].
11. Liebhardt, P., Maxa, J., Bernhardt, H., Aulrich, K., Thurner, S. (2022). Comparison of a conventional harvesting technique in alfalfa and red clover with a leaf stripping technique. *Agronomy*. Vol. 12, No. 6. Art. 1408. DOI: 10.3390/agronomy12061408. [in English].
12. Bakum, M.V., Krekot, M.M., Abduev, M.M., Maiboroda, M.M. (2019). Results of research of a pneumatic separator for additional sorting of safflower seed, *Visnyk of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*. Iss. 198. P. 74–77. [in English].

References

1. Spirin A.V., Tverdokhlib I.V., Kupchuk I.M., Poberezhets Yu.M. Obgruntuvannia enerhoefektyvnykh rezhymiv protsesu dosushuvannia produktiv fraktsiinoi pererobky liutserny. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 2021. № 2 (113). P. 142–151. [in Ukrainian].
2. Domokos-Szabolcsy, E., Yavuz, S.R.,



13. Bredykhin, V., Pak, A., Gurskyi, P., Denisenko, S., Bredykhina, K. (2021). Improving the mechanical and mathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 4, No. 1(112). P. 54–60. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.236938. [in English].

14. Alade, J., Bada, S.O., Schmitz, W. (2021). Computer-aided design and fabrication of a dry wind-sifter separator. *ACS Omega*. Vol. 6, No. 31. P. 20309–20320. DOI: 10.1021/acsomega.1c02192. [in English].

15. Tishchenko, L., Kharchenko, S., Bredykhin, V., Tsurkan, O. (2016). Identification of grain particle velocity through vibrating sieves. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2, No. 7(80). P. 63–69. [in English].

16. Ukrainian agriculture: promoting resilience in the face of war : report. Rome : FAO, 2024. URL: <https://fscluster.org/ukraine/document/ukrainian-agriculture-promoting>. [in English].

ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR FRACTIONATING DRY LEAF AND STEM MASS AND JUSTIFICATION OF THE NEED FOR NEW TECHNICAL SOLUTIONS

The article presents a systematic analysis of the current state and development prospects of technological approaches to fractionating dry leaf-stem biomass in feed production, aimed at isolating the leaf fraction as the most nutritionally valuable component of plant raw materials. The relevance of the study is determined by the high specific cost of feed in the cost structure of livestock products, the deficit of high-quality feed protein, and significant nutrient losses inherent in traditional technologies for processing hay and forage biomass.

The aim of the study is to generalize and

provide an engineering assessment of existing technologies for fractionating dry leaf-stem biomass, to identify their technological and structural limitations, and to substantiate the feasibility of developing new technical solutions to improve the efficiency of mechanical leaf separation. The methodological basis of the research consists of a systematic and comparative analysis of scientific publications, patent sources, and technical descriptions of machines implementing aerodynamic, threshing, and stripping separation principles.

It is shown that the efficiency of the fractionation process is determined by a combination of physical, mechanical, and aerodynamic properties of leaves and stems, including differences in their strength, brittleness, bulk density, and aerodynamic resistance. It is established that aerodynamic machines are characterized by increased energy consumption and a strong dependence of separation quality on material moisture content and particle size distribution; threshing units provide intensive mechanical impact but are accompanied by fragmentation of the stem fraction and contamination of the leaf product; stripping machines allow the production of a high-quality leaf fraction but are limited by low productivity and insufficient completeness of separation.

Based on the identified engineering constraints, the feasibility of developing stripping-type machines with a drum working element and a rational system for feeding and removing fractions is substantiated, creating prerequisites for improving the efficiency and resource efficiency of feed production technologies.

Keywords: fractionation, dry leaf–stem biomass, leaf fraction, aerodynamic machines, threshing machines, stripping machines, mechanical leaf separation, stripping drum, energy consumption, fractionation quality.

Відомості про автора

Сімаков Олег Олександрович – здобувач наукового ступеня доктора філософії з галузевого машинобудування Вінницького національного аграрного університету (м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ 21008, e-mail: simakov35@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2335-8980>).

Simakov Oleh – recipient of the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty 133 Industrial mechanical engineering Vinnytsia National Agrarian University (Vinnytsia, str. Sonyachna 3, VNAU 21008, e-mail: simakov35@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2335-8980>).

Стаття надійшла 28.11.2025

Стаття прийнята 09.12.2025

Опубліковано 25.12.2025