**Купчук І.М.**

к.т.н., доцент

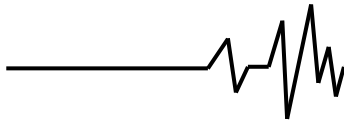
**Вінницький національний  
аграрний університет****Kupchuk I.**Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor**Vinnitsia National Agrarian  
University****УДК 636.2:631.363.22:631.3****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-2-2****ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕХНІКО-  
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ЗМІШУВАННЯ КОРМІВ**

У статті проведено комплексний аналіз сучасних систем приготування кормів для тваринництва з урахуванням різноманітних типів змішувачів, включаючи горизонтальні та вертикальні TMR міксери, шнекові, конічні та барабанні змішувачі для сухих компонентів. Здійснено класифікацію обладнання за принципом дії, конструктивними особливостями робочих органів та технологічними характеристиками, що дозволяє виділити ключові групи змішувачів залежно від призначення та масштабу господарств. Особливу увагу приділено аналізу конфігурацій шнеків і роторів, включаючи квадратні та круглі шнеки, а також технологію чергування роторів (staggered rotor), що забезпечує більш рівномірну циркуляцію корму всередині змішувача. Встановлено, що оптимізація геометрії шнеків і лопатей, нахилу поверхонь та застосування ріжучих елементів із твердосплавним покриттям сприяє підвищенню ефективності подрібнення і перемішування довговолоконистих і вологих кормових компонентів, зменшенню утворення містків і формуванню однорідної суміші.

Аналіз показав, що горизонтальні та вертикальні TMR міксери забезпечують високу точність дозування, скорочення часу циклу змішування та рівномірний розподіл поживних речовин, тоді як конічні та барабанні змішувачі ефективні для сухих і гранульованих кормів, забезпечуючи контрольовану швидкість змішування та мінімізацію втрат компонентів. Окремо виділено технологічні рішення, які дозволяють адаптувати обладнання до різних фізико-механічних властивостей кормових сумішей, зокрема вологості, довжини волокон та гранулометричного складу компонентів. У статті також окреслено перспективи подальших досліджень, серед яких вдосконалення конструкції вертикальних шнеків, оптимізація розташування та форми ріжучих елементів, інтеграція сенсорних систем для контролю однорідності суміші та адаптивного регулювання швидкості обертання шнеків, а також застосування цифрового моделювання і тривимірного аналізу потоків корму для обґрунтованого проектування та прогнозування ефективності нових конструкцій. Результати дослідження можуть бути використані для підвищення продуктивності, енергоефективності та технологічної надійності систем приготування кормів у сучасному тваринництві.

**Ключові слова:** кормозмішувач, повнораціонні міксери (TMR), вертикальний шнек, конструктивні конфігурації шнеків, однорідність кормових сумішей, енергоефективність технологічного процесу.

**Вступ.** Ефективний розвиток тваринницької галузі базується на оптимізації технологій годівлі сільськогосподарських тварин, що є фундаментальною передумовою для досягнення високої продуктивності та економічної ефективності, що передбачає комплексний підхід, який включає забезпечення повноцінною кормовою базою, мінімізацію втрат



поживності кормів та належну підготовку кормів до згодовування. Важливість повноцінної годівлі у тваринництві підтверджується її значною часткою у структурі собівартості кінцевої продукції. Зокрема, у виробництві молока витрати на корми становлять приблизно 50-55%, у виробництві яловичини – 65-70%, а у свинарстві – 70-75% [1]. Ці дані свідчать про те, що будь-яке підвищення ефективності використання кормів або зниження їх вартості за рахунок оптимізації годівлі матиме прямий і значний вплив на рентабельність тваринницьких господарств. Якісна годівля великої рогатої худоби (ВРХ) із використанням збалансованих, науково обґрунтованих раціонів сприяє підвищенню надоїв молока, поліпшенню якості м'ясної продукції, зміцненню імунної системи тварин, стійкості тварин до хвороб та є одним із ключових чинників, що визначає продуктивність та економічну доцільність ведення господарства.

Серед основних етапів технології годівлі, спрямованих на формування якісного та збалансованого раціону, відмічають процес приготування однорідної кормової суміші, що забезпечується за допомогою спеціалізованих змішувачів кормів.

Змішувачі кормів є важливим елементом технологічної системи годівлі ВРХ, оскільки їхнє конструктивне виконання, принцип роботи та технічні характеристики безпосередньо впливають на якісні показники процесу змішування, зокрема на рівномірність розподілу компонентів, швидкість приготування раціону та загальну енергоефективність процесу. Враховуючи важливість якісної підготовки кормів до згодовування тваринам та, зокрема, доведення кормової суміші до заданого ступеню однорідності, актуальним завданням є вдосконалення техніко-технологічного забезпечення для змішування кормів для ВРХ, що потребує систематизованого аналізу існуючих конструкцій змішувачів.

**Метою досліджень** є формування підґрунтя для вирішення задач підвищення ефективності процесу кормоприготування для ВРХ шляхом здійснення критичного аналізу основних типів конструкцій змішувачів кормів, що використовуються у сучасному сільському господарстві, визначення їх переваг, недоліків і напрямів удосконалення. Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- здійснити класифікацію змішувачів кормів за основними техніко-конструктивними ознаками;
- охарактеризувати принцип дії та особливості конструкції найпоширеніших типів змішувачів;
- окреслити тенденції розвитку техніки для кормоприготування у контексті потреб

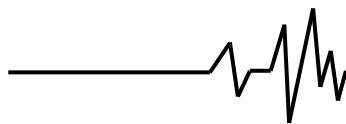
сучасного тваринництва.

**Методи досліджень.** У дослідженні було застосовано комплексний підхід, що включав аналітичний огляд наукових публікацій та технічної документації провідних виробників обладнання, порівняльний аналіз конструктивних особливостей різних типів кормозмішувачів, а також класифікацію техніко-технологічних рішень за принципом дії та функціональними характеристиками. Додатково використовувалися методи систематизації для узагальнення отриманих даних та визначення тенденцій розвитку, а також елементи структурно-функціонального аналізу для оцінки впливу конфігурації робочих органів на однорідність суміші та енергоефективність процесу.

**Результати досліджень.** В сучасній організації виробництва продукції тваринництва змішувачі кормів є невід'ємною складовою технологічного процесу приготування повнораціонних кормів для ВРХ, від технічного рівня яких, конструктивного виконання та експлуатаційних характеристик значною мірою залежить ефективність процесу годівлі, мінімізація втрати кормів та покращення рівня конверсії корму в цільову продукцію (молоко, м'ясо тощо) [2]. На основі функціонального аналізу конструктивних особливостей сучасних змішувачів визначено, що конструктивне виконання сучасних змішувачів має забезпечувати основні функції технологічної системи кормоприготування, які полягають у прийманні різномірних компонентів раціону (сінаж, солома, сіно, зернові, мінеральні домішки, премікси), подрібнення волокнистих компонентів (при наявності ножів чи ріжучих механізмів), рівномірне перемішування складових, дозованої видачі або роздачі готової кормосуміші.

Ці функції мають реалізовуватись з урахуванням специфіки годівлі ВРХ, зокрема – високої чутливості тварин до змін структури та якості корму. Ефективність змішувачів може бути оцінена за рівнем досягнення цільових функцій (min або max) сукупності критеріїв [3], основні із яких подано в Табл. 1 та які є, зазвичай, ортогональними по своїй природі, що зумовлює потребу у вирішенні оптимізаційної задачі задля підвищення загальної ефективності змішувачів кормів.

Основні конструктивні вимоги, що ставляться до кормозмішувачів спрямовані на досягнення високої якості змішування компонентів (CV, коефіцієнт однорідності) з урахуванням фізико-механічних властивостей компонентів. Робочі органи, такі як шнеки, лопаті чи барабани, мають бути сконструйовані таким чином, щоб забезпечити рівномірне перемішування навіть за фракційної



неоднорідності суміші, мінімізувати механічні втрати та виключити утворення «застійних зон» у робочому об'ємі бункера [3]. З метою підвищення зносостійкості та гігієнічної безпеки, всі елементи, що контактують з кормами, повинні виготовлятися із корозійностійких матеріалів або мати покриття зі зносостійких сплавів. Крім того, сучасні змішувачі мають оснащуватись автоматизованими системами управління, зокрема ваговими модулями, дозуючими пристроями, блоками контролю пропорцій інгредієнтів та засобами дистанційного моніторингу, що забезпечує точність та ефективність процесу приготування та видачі кормів [4].

**Таблиця 1**  
**Критерії оцінки ефективності змішувачів**

| Критерій                        | Цільова функція | Норма або орієнтовне значення |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| Коефіцієнт варіації (CV), %     | min             | Відхилення $\leq \pm 5$       |
| Час одного циклу змішування, хв | min             | 10-20                         |
| Об'єм бункера, м <sup>3</sup>   | max             | 4-30                          |
| Продуктивність, т/год           | max             | 1-15                          |
| Енергоспоживання, кВт           | min             | 5-40                          |
| Рівень пошкодження зерна, %     | min             | $\leq 3$                      |
| Коефіцієнт однорідності         | max             | $\geq 0,9$                    |

Конструкційне виконання та принцип дії змішувачів суттєво впливають на однорідність суміші, ступінь руйнування структури кормових інгредієнтів, а також на енергоємність процесу змішування. На основі аналізу науково-технічної літератури, патентних матеріалів та галузевих стандартів, змішувачі можна класифікувати за критеріями, що представлені на рис. 1. Відповідно до запропонованої класифікації, за типом робочого органу вони поділяються на стрічкові, шнекові, змішувачі із лопатевим валом, барабанні та комбіновані.

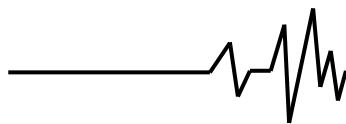
Перевагою застосування стрічкових робочих органів є висока ступінь однорідності суміші при мінімальному руйнуванні структури кормових компонентів за рахунок інтенсивного осьового та радіального перемішування їх стрічками (одинарними або подвійними) розташованими по гвинтовій лінії [7]. Лопатеві змішувачі зазвичай застосовуються у стаціонарних установках середньої продуктивності та оснащені жорстко закріпленими або маятниковими лопатями, які переміщують корм у різних напрямках. Функціонування шнекових змішувачів полягає у

створенні циркуляції технологічного середовища та, як наслідок, перемішуванні та подачі інгредієнтів матеріалу витками одного або кількох шнеків [4, 5]. У барабанних змішувачах технологічний процес відбувається за рахунок надання руху самому корпусу змішувача – барабану. При цьому природа рушійної сили процесу є гравітаційною та фрикційною із застосуванням пасивних робочих органів (внутрішніх перегородок, лопатей, спіральних навілок тощо) або вібраційною за рахунок використання генераторів коливального руху – вібробуджувачів (механічного, електромеханічного, пневматичного чи інших типів). За положенням робочого органу в просторі найбільшого поширення набули змішувачі із горизонтальним та вертикальним розташуванням, проте відомі конструкції із розташуванням робочого органу, зокрема барабану під кутом до горизонту, а також вібраційні змішувачі, у яких контейнер, який є робочим органом барабанного типу виконує складний рух у кількох площинах відносно рухомих та нерухомих систем координат. Також у технічній літературі зустрічається конструктивне виконання змішувача із вертикальним шнеком та кріпленням до приводу шарнірно-карданною передачею, що дозволяє йому змінювати положення у процесі змішування компонентів [6].

Отже, підсумовуючи дійдемо висновку, що залежно від орієнтації робочого органу змішувача в просторі можна виокремити традиційні конструкції – вертикальні, і горизонтальні, а також такі, у яких робочий орган розташований під кутом від до горизонту в діапазоні  $0 < \alpha_{\text{гор}} < 90$  градусів та змішувачі, конструктивне виконання та монтаж робочого органу яких дозволяє варіювати кут нахилу до горизонту в процесі експлуатації.

Основною перевагою вертикальних конструкцій є компактність, відносно невелика маса, спрощена кінематична схема та висока ефективність при змішуванні кормів із подрібненими компонентами. Серед недоліків відзначають більш тривалий триваліший цикл обробки суміші порівняно з горизонтальними аналогами [7].

Горизонтальні змішувачі кормів відзначаються високою продуктивністю та широко застосовуються у великих тваринницьких комплексах [8], проте незважаючи на поширеність і відносно просту конструкцію, мають низку суттєвих недоліків. Зокрема, вони характеризуються підвищеним енергоспоживанням при тривалому циклі змішування, що пов'язано з необхідністю забезпечення інтенсивного перемішування по всій довжині робочої камери. Крім того, через



лінійний характер переміщення компонентів виникають труднощі із досягненням високої однорідності суміші, особливо при значній різниці у густині чи гранулометричному складі

інгредієнтів. Також обмеження у заповненні змішувальної камери (до 70% об'єму) знижує ефективність завантаження і продуктивність машини [9].

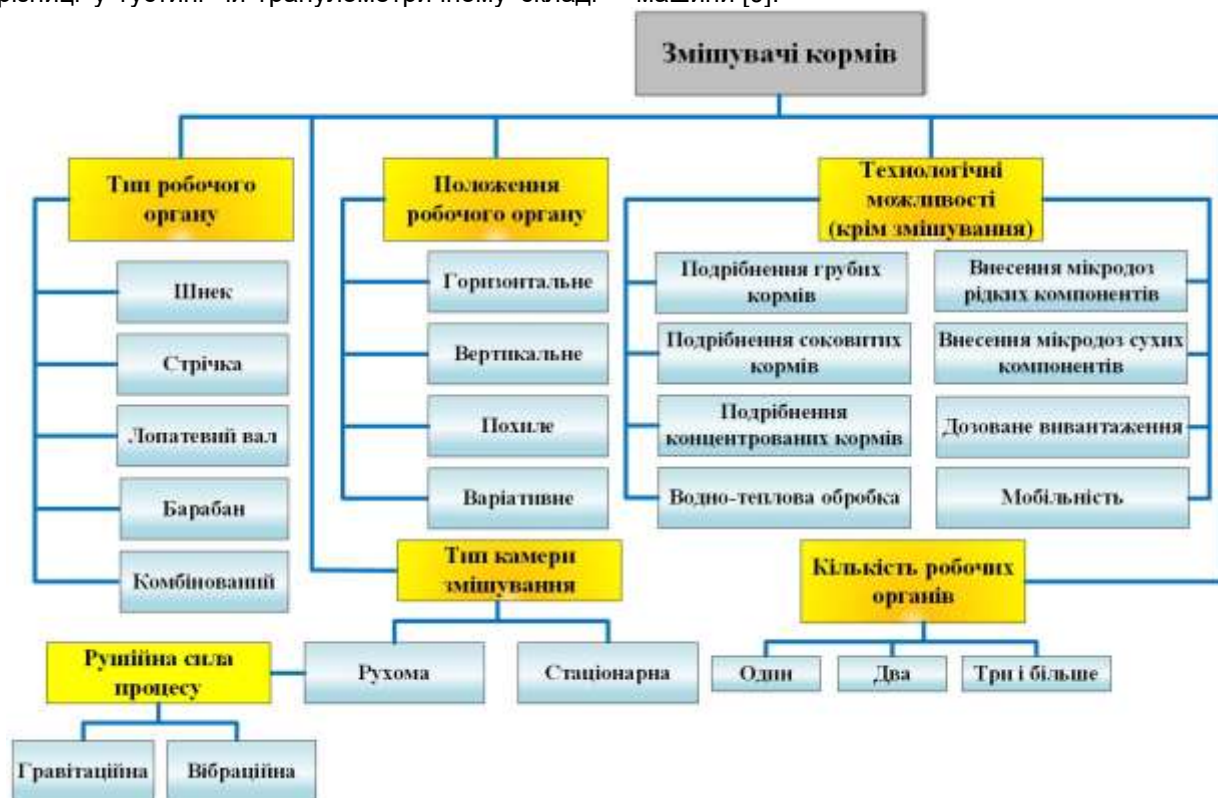


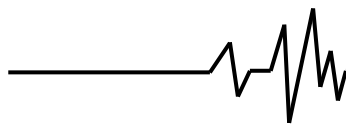
Рис. 1. Класифікація змішувачів кормів для ВРХ

Змішувачі із похилим та варіативним виконанням орієнтації в просторі робочого органу поєднують конструктивні особливості горизонтальних та вертикальних систем, що дозволяє досягти кращого перемішування за рахунок поєднання вертикальної та горизонтальної компонент руху кормової маси. Основною перевагою таких змішувачів є підвищена ефективність перемішування завдяки турбулентному руху компонентів, що зменшує час змішування та забезпечує високу однорідність суміші навіть при різних фізико-механічних властивостях інгредієнтів [9]. Крім того кутове розташування сприяє кращому самоочищенню змішувальної камери та полегшенню розвантаження. Водночас, недоліками є ускладнена конструкція приводу і механічних з'єднань, що підвищує вартість виготовлення та технічного обслуговування, а також збільшене навантаження на підшипники й опори через динамічне зміщення центру маси при роботі.

Сучасним напрямком розвитку технологічного забезпечення кормоприготування для ВРХ є розширення функціональних можливостей та поєднання інших технологічних, контрольних та сервісних операцій у одній конструкції змішувача.

Лопатеві змішувачі (рис. 2) відносяться до конвективних апаратів періодичної чи безперервної дії, у яких перемішування відбувається завдяки обертанню вала з лопатями, що створюють багатовекторні потоки матеріалу (радіальні, тангенціальні та осьові). Принцип їх роботи ґрунтується на поєднанні зсуву, перевертання та псевдозрідження: частинки піднімаються лопатями й вільно падають під дією сили тяжіння, формуючи стан флюїдизації. Це забезпечує тривимірний рух суміші, усуває застійні зони та сприяє швидкому досягненню високої однорідності навіть за короткого циклу (10–15 секунд у промислових двовальних моделях) [10]. Одновальні конструкції характеризуються простотою, нижчою вартістю та економічністю, однак забезпечують менш інтенсивний режим змішування і можуть допускати формування «мертвих зон». Двовальні апарати завдяки синхронізованій роботі валів формують інтенсивніші конвективні потоки та зону псевдозрідження, що забезпечує високу гомогенність незалежно від типу компонентів (сипких, гранульованих чи в'язких) [11].

Ключовими перевагами лопатевих змішувачів є універсальність у роботі з різними за структурою матеріалами, дбайливе



поводження з продуктом без значного механічного руйнування, відсутність застійних зон та можливість швидкого вивантаження через розвантажувальні канали. Разом із тим вони мають низку обмежень: ускладнене очищення в традиційних конструкціях, залежність ефективності від правильного налаштування швидкості, кута нахилу й форми лопатей, а також вищу собівартість та габаритність, особливо у двовальних моделях [10, 11]. Таким чином, вибір між одно- та двовальними лопатевими змішувачами визначається балансом між вимогами до однорідності суміші, продуктивністю та економічною доцільністю: перші є оптимальними для простіших завдань із помірними вимогами, тоді як другі – для високотехнологічних процесів, де критичними є швидкість, якість та універсальність змішування.



а)



б)

**Рис. 2. Лопатеві змішувачі: а) одновальний; б) двовальний**

Шнекові змішувачі являють собою конвективні апарати, де перемішування досягається завдяки складним осьовим і радіальним потокам, створюваним спіральними робочими органами [12]. Вертикальні змішувачі (рис. 3, а) реалізують циркуляційний принцип: матеріал піднімається гвинтовим шнеком угору та під дією сили тяжіння переміщується вниз, формуючи замкнений потік. Це забезпечує рівномірність перемішування при відносно низьких енерговитратах, проте потребує більшої

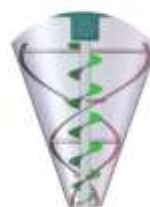
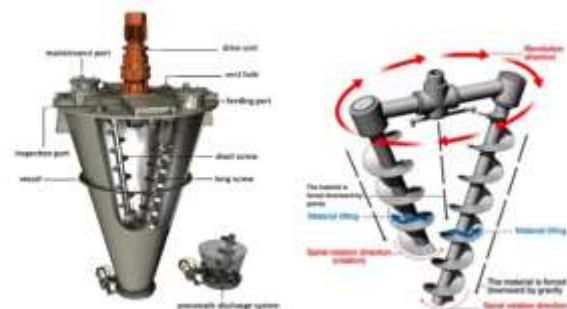
тривалості процесу. Вони ефективні для сипких матеріалів та гранулятів у середніх обсягах виробництва.



а)



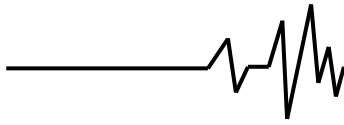
б)



в)

**Рис. 3. Шнекові змішувачі: а) вертикальний; б) горизонтальний; в) конічний**

Горизонтальні змішувачі (рис. 3, б) працюють інтенсивніше завдяки використанню одного або двох шнекових валів, які формують зустрічні осьові й радіальні потоки. Особливо



високу якість гомогенізації забезпечують двовальні конструкції, де виникає додатковий турбулентний рух частинок. У таких апаратах досягається висока швидкість масообміну, що робить їх незамінними у комбікормовій, фармацевтичній та будівельній промисловості.

Окремим різновидом є конічні шнекові змішувачі (рис. 3, в), які характеризуються конічною формою робочого бака та наявністю одного або декількох шнеків зі спіральним профілем, що забезпечує ефективне переміщення і інтенсивне перемішування матеріалу. Завдяки конічній геометрії суміш переміщується від стінок до центру та віднизу вгору, що сприяє швидкому досягненню однорідності навіть при різних фракціях або вологості компонентів [6]. Переваги таких змішувачів включають компактність, універсальність у роботі з різними типами кормів та відносно низьке енергоспоживання. До недоліків належать обмежена продуктивність при великих об'ємах та підвищена складність технічного обслуговування. Вони ефективно застосовуються для приготування комбікормів у тваринництві та лабораторних дослідженнях.

TMR-змішувачі (Total Mixed Ration) відіграють важливу роль у забезпеченні процесу годівлі великої рогатої худоби, особливо в молочному скотарстві та дозволяють досягти однорідного змішування різноманітних кормових інгредієнтів, таких як сіно, силос, концентрати та кормові добавки, що забезпечує збалансованість раціону та сприяє оптимальному травленню та продуктивності тварин.

Конструктивно TMR-змішувачі класифікуються за розташуванням робочих органів. Горизонтальні змішувачі оснащені 2-4 спіральними шнеками, які обертаються у горизонтальній площині, що дозволяє ефективно обробляти великі об'єми кормів, забезпечуючи рівномірне змішування та подрібнення довгих волокон. Вертикальні змішувачі мають один, два або три вертикальні шнеки, що забезпечує можливість обробки різних видів кормів, включаючи великі тюки сіна та силосу, і характеризується швидким та ефективним змішуванням при мінімальному зносі робочих елементів. Комбіновані системи поєднують вертикальні шнеки з роторами або додатковими ножами, що підвищує якість змішування та подрібнення кормових компонентів.

Основні переваги використання TMR змішувачів пов'язані з підвищенням ефективності годівлі, оскільки однорідність змішування кормів забезпечує стабільне та збалансоване харчування тварин, що позитивно впливає на продуктивність та здоров'я поголів'я. Крім того, ефективне подрібнення та змішування

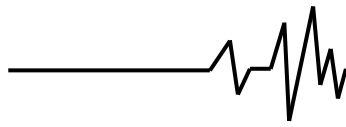
компонентів раціону сприяє зменшенню непродуктивних втрат корму та підвищенню його засвоюваності.

Незважаючи на численні переваги, використання TMR змішувачів має і певні обмеження. Висока вартість та витрати на експлуатацію сучасного обладнання потребує значних фінансових витрат на обслуговування та ремонт. Ефективна робота змішувачів потребує застосування потужних енергетичних засобів, що може бути обмежуючим фактором для малих та середніх господарств. Крім того, належне використання та технічне обслуговування TMR змішувачів потребує високої кваліфікації персоналу.

Закордонні виробники TMR змішувачів представляють широкий спектр обладнання, що відрізняється конструктивними особливостями, продуктивністю та застосуванням у різних типах господарств.

Французько-американська компанія «KUNH» пропонує причіпні моделі серій Euromix (рис. 4, а) та Profile (рис. 4, б), оснащені одним, двома або трьома вертикальними шнеками та самохідні моделі серій Access (з одним шнеком), Power та Intense (з двома шнеками) та фронтальною завантажувальною фрезою (рис. 4, в). Конструкція шнека для змішування від компанії «KUNH» характеризується здатністю забезпечувати швидке та гомогенне перемішування при мінімальному споживанні енергії, що підтверджена численними офіційними випробуваннями. Подвійний крок обмотки (double-pitch) на останній чверті лопатевого профілю (flighting) сприяє оптимальному розпушуванню матеріалу незалежно від ступеня завантаження бункера. Форма шнека у вигляді безперервної гвинтової лінії забезпечує плавне поступове підняття корму, запобігаючи раптовим піковим навантаженням на привод (рис. 4, г). Асиметричні ножі з ефектом «самоочищення» мають східчасту конструкцію ріжучих кромок, що сприяє мінімізації енерговитрат на процеси подрібнення та змішування кормів за різної вологості та довжини волокон. Вбудовані вагові пристрої забезпечують точне дозування компонентів, що сприяє ефективному травленню у худоби [13].

Нідерландська компанія «Trioliet» спеціалізується на вертикальних змішувачах серії Solomix, які оснащені вертикальними шнеками (одним, двома або трьома) та різними варіантами розвантаження, такими як фронтальним стрічковим транспортером (рис. 5, а) або із криволінійним кормометачем (рис. 5, б). Також компанія пропонує широкий модельний ряд змішувачів встановлених на шасі вантажного автомобіля (рис. 5, в), самохідних змішувачів-кормороздавачів із фронтальною



фрезою і завантажувальним транспортером (рис. 5, г), стаціонарних змішувачів та автоматизованих систем годівлі [14].



а)



б)



в)



г)

Рис. 4. TMR змішувачі компанії «KUNN»: а) одношнековий змішувач «EUROMIX I Single-Auger Mixers»; б) двошнековий змішувач «PROFILE PLUS 2 CL Twin-Auger Mixers»; в) самохідний змішувач-кормороздавач «Access»; г) компоновка робочого органу



а)



б)



в)

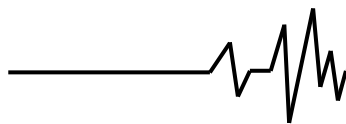


г)



д)

Рис. 5. TMR змішувачі компанії «TRIOLIET»: а) одношнековий кормовий змішувач з соломометачем «Solomix P1»; б) двошнековий змішувач із фронтальним стрічковим транспортером «Solomix 2»; в) змішувач на базі шасі вантажного автомобіля «Truckmount»; г) самохідний змішувач з фронтальною фрезою та завантажувальним транспортером «Triotrac L»; б) компоновка робочого органу



Технологічний процес змішування компонентів корму для всіх перелічених варіантів здійснюється одноступінним робочим органом – вертикальним шнеком. Конструкція шнека відзначається рядом інженерних рішень, спрямованих на підвищення ефективності роботи та довговічності. Зокрема, запатентована компанією Trioform форма ножів забезпечує якісне різання кормових компонентів при зниженому опорі руху матеріалу, що сприяє енергоощадності процесу. Шнек виконаний секційним (рис. 5, д), лопаті зварені внапуск, завдяки чому забезпечується підвищення міцності та зносостійкості, а оптимізована геометрія гвинтової лінії забезпечує високий коефіцієнт заповнення, швидке та рівномірне перемішування. Опора шнека на шасі дозволяє забезпечити прийняття та поглинання рамою робочих навантажень. Моделі доступні в об'ємах від 4 до 47 м<sup>3</sup> та призначені для швидкого та ефективного змішування великих обсягів кормів. Завдяки високій швидкості змішування та універсальним опціям розвантаження обладнання підходить як для малих, так і для великих господарств [14].

Канадська компанія «Supreme International» спеціалізується на виробництві широкої лінійки змішувачів для приготування повнозмішаних раціонів (TMR), які характеризуються надійністю, довговічністю та високою якістю змішування кормових компонентів. Виробник пропонує змішувачі в кількох конфігураціях, що забезпечує їх адаптивність до різних умов експлуатації. Причіпні моделі (Pull-Type) (рис. 6, а) призначені для агрегування з тракторами та відзначаються універсальністю і широким діапазоном місткостей. Стационарні установки (Stationary) (рис. 6, б) використовуються як елементи фіксованих змішувальних пунктів і доступні у варіантах з механічним та гідростатичним приводом. Змішувачі на базі автомобільного шасі (Truck-Mount) (рис. 6, в) забезпечують високу мобільність, що дозволяє оперативно здійснювати приготування та роздачу кормів на різних фермах та випускаються у модифікаціях із механічним або гідростатичним приводом. Таким чином, компанія формує цілісну систему технічних рішень для виробництва TMR, яка поєднує енергоефективність, зручність експлуатації та стабільність якості кормів. Конструктивна концепція цих машин ґрунтується на застосуванні вертикальних циліндричних шнеків із оптимізованою геометрією (рис. 6, г), що забезпечує рівномірність подрібнення та перемішування інгредієнтів незалежно від їх фізичної

структури чи щільності. Робочі органи випускаються в двох конфігураціях (рис. 6, д): стандартний подрібнюючий шнек (ліворуч) та кукурудзяний шнек (праворуч), який має ширший вигин та крутіший кут нахилу [15].



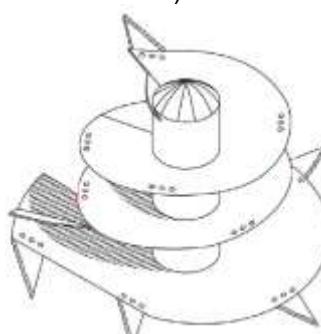
а)



б)



в)

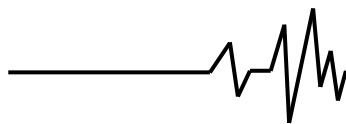


г)



д)

Рис. 6. TMR змішувачі компанії «Supreme International»: а) причіпна модель «Pull-Type»; б) модель «Stationary»; в) змішувачі на базі автомобільного шасі «Truck-Mount»; г) циліндричний шнек; д) варіанти конструктивного виконання робочого органу



Канадська компанія «Highline Manufacturing» пропонує два основних типи шнекових кормозмішувачів: самохідний (AccuMix™ 1000s) з автономним приводом і комплексом сучасних функцій (рис. 7, а) та причіпні моделі (рис. 7, б) різної продуктивності, що буксируються трактором [16].



а)



б)



в)

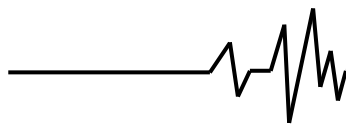
**Рис. 7 – TMR змішувачі компанії «Highline Manufacturing»: а) модель самохідного кормозмішувача «AMX1000s Accumix»; б) причіпний кормозмішувач AMX850T; в) робочі органи TMR змішувачів**

Робочий орган виконаний у вигляді

вертикального шнека із подрібнювальними ножами із ступінчастими кромками, яких, за потреби, можна встановлювати у кількості до 10 одиниць (рис. 7, в) [16].

Канадська компанія «Jaylor» пропонує широкий асортимент вертикальних та горизонтальних TMR-міксерів, які доступні в причіпній, самохідній, стаціонарній конфігураціях та встановлені на шасі вантажівки, включаючи Mini Mixers (моделі 5050, 5100, 5150, 5275) (рис. 8, а), Single Auger (моделі 5350, 5400, 5425, 5575) – компактні вертикальні міксери із одним робочим органом (рис. 8, б), Twin Auger (моделі 5600, 5650, 5750, 5850) – двошнекові змішувачі-кормороздавачі, Twin Auger HD (важкі моделі 5750HD, 5850HD, 51000HD, 51250HD) – моделі з двома шнеками та підвищеною міцністю і вантажопідйомністю (до 75 % більше стандартної версії двошнекової моделі) (рис. 8, в), горизонтальні Quad-Auger міксери (моделі H1650, H1850, H1950) для інтенсивних фідлотів з високими вимогами до продуктивності (рис. 8, г), які оснащені чотирма горизонтальними шнеками (рис. 8, д), а також стаціонарні варіанти, що охоплюють як Mini, так Single, так і Twin/Twin HD серії з різними об'ємами і конфігураціями. Особливістю конструкції вертикальних змішувачів «Jaylor» є використання власної розробки – квадратного шнека (Square-Cut Auger), що поєднує низку технічно обґрунтованих рішень для оптимізації процесу змішування. Нахилена верхня частина шнека спрямовує корм до центра бункера та запобігає утворенню «містків» із тюків, квадратні кромки забезпечують ефективніше подрібнення довговолокнустих кормів порівняно з традиційними круглими профілями, а застосування ковзної пластини знижує тертя і дозволяє зменшити потребу в потужності приводу. Ножі із твердосплавним (карбід вольфраму) напленням зберігають ріжучу здатність упродовж тривалої експлуатації, а їхнє розташування під кутом 45° (ножі типу Alexander) у поєднанні з вертикальними ножами забезпечує інтенсивне різання та рівномірний розподіл компонентів. Сукупність цих елементів сприяє формуванню гомогенної кормової суміші, що відповідає вимогам сучасних технологій годівлі великої рогатої худоби [17].

Американська компанія «Roto-Mix» пропонує моделі горизонтальних змішувачів з технологією чергування роторів «Staggered Rotor Generation II» (рис. 9, а), що полягає у використанні спеціального ротора із лопатями, який піднімає корм до бічних шнеків, що рухають корм з одного кінця до іншого. Цей підйомний механізм усуває застрягання грубих або довгих часток корму під нижнім шнеком, що часто спостерігається в традиційних змішувачах. За інформацією виробника, запропоноване



технічне рішення дозволяє зменшити час змішування на 30% та забезпечує рівномірний розподіл компонентів у кормі, підвищуючи ефективність приготування кормової суміші. У вертикальному сегменті, компанією «Roto-Mix» представлено серію одношнекових змішувачів з робочим об'ємом від 8,9 до 14,6 м<sup>3</sup>, які призначені для малих та середніх господарств і відзначаються модульною конструкцією з низьким профілем, що полегшує завантаження та забезпечує якісне вивантаження завдяки

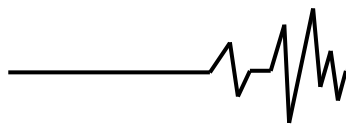
різним типам транспортерів та серію із двома шнеками з гідравлічним приводом, що забезпечують інтенсивне піднімання суміші (приблизно 1,07 м за один оберт), а двошвидкісна коробка передач підвищує ефективність процесу змішування та полегшує очищення робочої камери. Подрібнення грубих кормів здійснюється за рахунок встановлених на бічних гранях шнека ножів (рис. 9, б) [18].



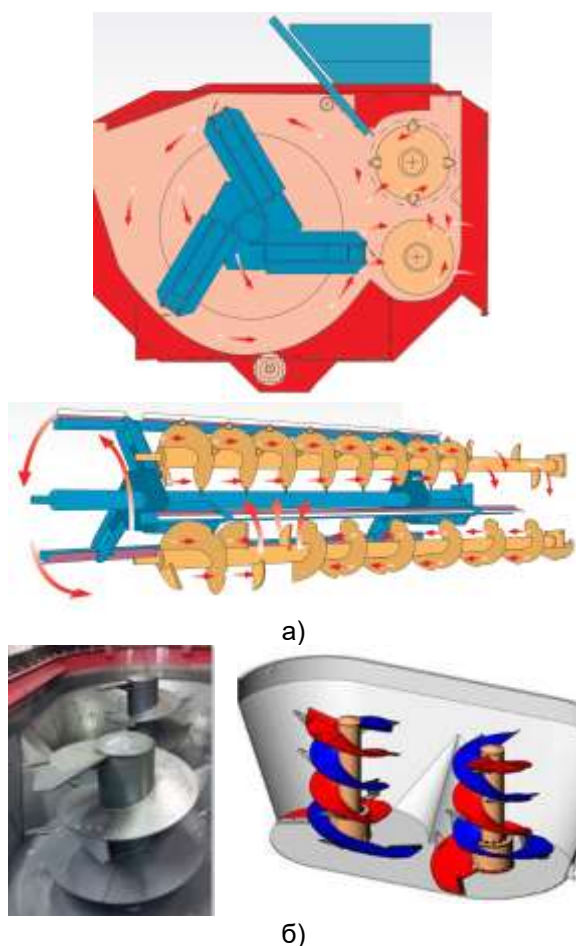
**Рис. 8. TMR змішувачі компанії «Jaylor»: а) причіпний змішувач «Jaylor 5100 Trailer»; б) причіпний змішувач «Jaylor 5400 Single Auger TMR Mixer»; в) вертикальний змішувач у конфігурації на шасі вантажного автомобіля «5850HD TMR Truck Mount»; г) горизонтальний змішувач на шасі автомобіля «Jaylor H1850 Quad Auger Mixer»; д) робочий орган «Square-Cut Auger»**

Американська компанія «NDEco» виробляє як вертикальні, так і горизонтальні кормозмішувачі, що відрізняються конструктивним виконанням і діапазоном робочих об'ємів. Вертикальні моделі представлені серіями S, U та FS, які можуть бути одно-, дво- та трьохшнековими із місткістю від 9 до 48 м<sup>3</sup>. Вони обладнані рамними конструкціями,

багатоступінчастими планетарними редукторами, різними варіантами вивантаження та додатковими інженерними рішеннями, зокрема чотириточковою системою зважування й модифікованою геометрією днища у поєднанні з перекриттям траєкторій шнеків, що забезпечує більш рівномірний розподіл матеріалу та прискорене розвантаження робочої камери [19].



дозволяє адаптувати обладнання до різного масштабу господарств, від малих фермерських до великих промислових комплексів.



**Рис. 9. Робочі органи TMR змішувачів компанії «ROTO-MIX»: а) принципова схема системи горизонтальних роторів «Staggered Rotor Generation II»; б) компонування змішувачів із вертикальними робочими органами**

На бічних поверхнях навивки встановлені вигнуті ножі діаметром 24 дюйми з карбідними вставками (рис. 10, а), що дозволяє ефективно обробляти тюки та грубі корми. Горизонтальні змішувачі серії Н оснащені трьома шнеками (рис. 10, б), з яких нижній діаметром близько 0,76 м одночасно виконує функції робочого органа і приводного вала, що зменшує кількість рухомих елементів. Їх робочий об'єм становить 9–18 м<sup>3</sup>, вивантаження здійснюється через бічний шнек або конвеєр довжиною до 1,5 м, а силові елементи виконані за індустріальним стандартом, що підвищує надійність і забезпечує тривалий термін експлуатації [19].

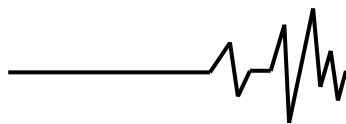
Аналізуючи сучасні розробки у сфері техніки для приготування кормів, можна виділити кілька чітких тенденцій, які формуються під впливом потреб сучасного тваринництва. По-перше, спостерігається поступова уніфікація та модульність конструкцій кормозмішувачів, що



Нижній шнек діаметром 0,76 м, з витками товщиною 12,7 мм та насічками, забезпечує ефективне перемішування корму та прискорене його вивантаження.

Верхні шнеки мають діаметр 0,61 м (для моделі H560 — 0,71 м) і виготовлені з витками товщиною 9,5 мм із насічками, що забезпечує інтенсивну дію під час перемішування кормових компонентів.

**Рис. 10. Робочі органи TMR змішувачів компанії «NDEco»: а) вертикальний шнек із ножами; б) компонування системи горизонтальних шнеків**



По-друге, поширюється використання вертикальних і горизонтальних шнекових систем із вдосконаленими ріжучими елементами та конфігураціями шнеків (наприклад, квадратний шнек «Jaylor» або технологія чергування роторів «Roto-Mix»), що забезпечує підвищену однорідність суміші, мінімізацію сортування корму та ефективну обробку довговолонистих або вологих компонентів. По-третє, значна увага приділяється енергоефективності: застосування ковзаючих пластин, оптимізація кута нахилу шнеків та роторів дозволяє зменшити витрати енергії без втрати якості змішування. По-четверте, розвиваються інтегровані системи контролю процесу приготування кормів, включаючи автоматичне дозування компонентів та моніторинг однорідності суміші, що відповідає вимогам точного тваринництва (precision livestock farming). Нарешті, помітна тенденція до поліпшення експлуатаційних характеристик, таких як довговічність ріжучих елементів (використання твердосплавних напилень), легкість очищення і обслуговування, а також адаптація до сучасних стандартів безпеки і санітарних норм. У сукупності ці тенденції свідчать про системний підхід до підвищення продуктивності та ефективності годівлі тварин при одночасному зменшенні витрат ресурсів.

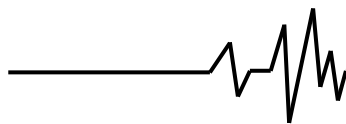
**Висновки та перспективи подальших досліджень.** За результатами аналізу сучасних кормозмішувачів для тваринництва встановлено, що основними напрямками розвитку є підвищення однорідності кормових сумішей, зменшення енергетичних витрат та забезпечення універсальності обладнання для господарств різних масштабів. Вивчення різних конфігурацій шнеків і роторів, включаючи вертикальні та горизонтальні змішувачі від Jaylor, Roto-Mix, Highline та інших виробників, показало, що застосування шнеків із оптимізованою геометрією (квадратні, круглі), нахилених поверхонь і ріжучих елементів із твердосплавним покриттям забезпечує ефективне подрібнення та перемішування довговолонистих і вологих кормових компонентів, зменшення утворення містків і формування однорідної суміші. Окремо технологія чергування роторів (staggered rotor) забезпечує більш рівномірну циркуляцію корму всередині змішувача: різноспрямоване розташування роторів і змінний кут нахилу лопатей сприяє переміщенню суміші з одного кінця камери в інший, підвищуючи однорідність та скорочуючи час змішування без додаткового енергоспоживання.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на вдосконалення конфігурацій шнеків і роторів з метою підвищення енергоефективності та однорідності суміші. Зокрема, актуальним є дослідження варіантів геометрії кромки шнека, кута нахилу ріжучих елементів та розташування вертикальних і горизонтальних ножів для оптимізації циркуляції корму. Крім того,

перспективним напрямом є інтеграція сенсорних систем для автоматичного контролю однорідності суміші та регулювання швидкості обертання шнека залежно від фізико-механічних характеристик компонентів. Використання цифрового моделювання та тривимірного аналізу потоків корму всередині змішувача дозволить науково обґрунтовано коригувати конструкцію та прогнозувати ефективність нових конфігурацій до їх практичної реалізації.

### Список використаних джерел

1. Калетнік Г.М., Кулик М.Ф., Глушко Я.Т. та ін. Енергоощадні технології кормів – основа конкурентоздатності тваринництва: монографія. Вінниця: Теза, 2006. 340 с.
2. Мазур В. А., Панцирева Г. В., Купчук І. та ін. Розробка енергоефективного та екологоорієнтованого техніко-технологічного забезпечення для кормовиробництва АПК України: монографія. Вінниця: ВНАУ, 2023. 211 с.
3. Sharma D.N., Mukesh S. Farm Machinery Design: Principles and Problems. New Delhi: Dhanpat Rai & Co., 2010. 432 p.
4. Полевода Ю.А., Волинець Є.О. Аналіз розвитку технологічного обладнання для виробництва харчових сумішей. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2020. № 4 (111). С. 72–79. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-4-8>
5. Волинець Є. О. Розробка автоматизованого кормороздавача для великої рогатої худоби: дис. ... д-ра філос. зі спец. 133 «Галузеве машинобудування». Вінниця: Вінницький нац. аграр. ун-т, 2023. 170 с. Режим доступу: URL: <https://vsau.org/nauka/df-05854043>.
6. Dahan Mixer Machinery Co., Ltd. What is the working principle of conical twin screw mixer? – Режим доступу: <https://www.dahanmixer.com/news-center/What-is-the-working-principle-of-conical-twin-screw-mixer-.html> (дата звернення: 10.08.2025).
7. Stone W.C. Nutritional approaches to minimize subacute ruminal acidosis and laminitis in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*. 2004. Vol. 87. P. E13–E26. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)70057-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)70057-0)
8. García R., López S., Fernández M., Bodas R., González J.S. In vitro screening of the potential of numerous plant species as antimethanogenic feed additives for ruminants. *Animal Feed Science and Technology*. 2008. Vol. 145, № 1-4. P. 245–258. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.04.015>
9. Ottino J.M., Khakhar D.V. Mixing and segregation of granular materials. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1999. Vol. 32. P. 55–91. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.55>
10. Yaraghi A., Ebrahimi M., Ein-Mozaffari F. Mixing assessment of non-cohesive particles in a paddle mixer through experiments and discrete element method (DEM). *Advanced Powder*



Technology. 2018. Vol. 29, No. 11. P. 3231-3239.  
<https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.07.019>

11. Garlway Machinery. What are the advantages and disadvantages of a twin shaft mixer?. 2025. Режим доступу: URL: <https://garlway.com/faqs/what-are-the-advantages-and-disadvantages-of-a-twin-shaft-mixer> (дата звернення: 10.08.2025).

12. Дудін В.Ю., Говоруха В.Б. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів стрічково-гвинтового змішувача сипких кормів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2023. № 53, С. 112–121. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.112-121>

13. KUHN. Виробник сільськогосподарського обладнання. Офіційний вебсайт. 2025. Режим доступу: <https://www.kuhn.ua/> (дата звернення: 10.08.2025).

14. Trioliet. Manufacturer of feeding equipment for farm animals. Офіційний вебсайт. 2025. Режим доступу: <https://www.trioliet.com/> (дата звернення: 10.08.2025).

15. Supreme International Ltd. Manufacturer of vertical mixers and feeding equipment for farm animals. Офіційний вебсайт. 2025. Режим доступу: <https://supremeinternational.com/> (дата звернення: 10.08.2025).

16. Highline Manufacturing. Manufacturer of agricultural equipment, including feed mixers and feed processing equipment. Офіційний вебсайт. 2025. Режим доступу: <https://www.highlinemfg.com/en-us/> (дата звернення: 10.08.2025).

17. Jaylor. Manufacturer of TMR feed mixers. Офіційний вебсайт. 2025. Режим доступу: <https://jaylor.com/> (дата звернення: 10.08.2025).

18. Roto-Mix. Manufacturer of livestock feed mixing equipment, compost mixers, and manure spreaders. Офіційний вебсайт. 2025. Режим доступу: <https://www.rotomix.com/> (дата звернення: 10.08.2025).

19. NDEco. Manufacturer of livestock TMR feed mixers, including vertical and horizontal models. Офіційний вебсайт. 2025. Режим доступу: <https://ndeco.com/> (дата звернення: 10.08.2025).

## References

1. Kaletnik, H.M., Kulyk, M.F., Hlushko, Ya.T., et al. (2006). *Enerhooshchadni tekhnolohiyi kormiv – osnova konkurentozdatnosti tvarynnystva* [Energy-saving feed technologies – the basis of livestock competitiveness]. Vinnytsia: Teza.

2. Mazur, V.A., Pantsyeva, H.V., Kupchuk, I., et al. (2023). *Rozrobka enerhoefektyvnoho ta ekolohoorientovanoho tekhniko-tekhnolohichnoho zabezpechennya dlya kormovyrobnytstva APK Ukrainy* [Development of energy-efficient and eco-oriented technical-technological support for feed production in Ukrainian agribusiness]. Vinnytsia:

VNAU.

3. Sharma, D.N., & Mukesh, S. (2010). *Farm Machinery Design: Principles and Problems*. New Delhi: Dhanpat Rai & Co.

4. Polevoda, Yu.A., & Volynets, Ye.O. (2020). Analiz rozvytku tekhnolohichnoho obladnannya dlya vyrobnytstva kharchovykh sumishei [Analysis of technological equipment development for food mixtures production]. *Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK*, 4(111), 72–79. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-4-8>

5. Volynets, Ye.O. (2023). *Rozrobka avtomatyzovanoho kormorozdavacha dlya velikoi rohatoyi khudoby* [Development of an automated cattle feed distributor] (Doctoral dissertation, Vinnytsia National Agrarian University). <https://vsau.org/nauka/df-05854043>

6. Dahan Mixer Machinery Co., Ltd. (2025). What is the working principle of conical twin screw mixer? Retrieved August 10, 2025, from <https://www.dahanmixer.com/news-center/What-is-the-working-principle-of-conical-twin-screw-mixer-.html>

7. Stone, W.C. (2004). Nutritional approaches to minimize subacute ruminal acidosis and laminitis in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 87, E13–E26. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)70057-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)70057-0)

8. García, R., López, S., Fernández, M., Bodas, R., & González, J.S. (2008). In vitro screening of the potential of numerous plant species as antimethanogenic feed additives for ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 145(1–4), 245–258. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.04.015>

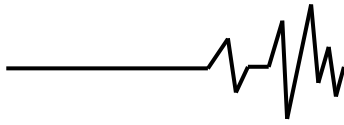
9. Ottino, J.M., & Khakhar, D.V. (1999). Mixing and segregation of granular materials. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32, 55–91. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.55>

10. Yaraghi, A., Ebrahimi, M., & Ein-Mozaffari, F. (2018). Mixing assessment of non-cohesive particles in a paddle mixer through experiments and discrete element method (DEM). *Advanced Powder Technology*, 29(11), 3231–3239. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.07.019>

11. Garlway Machinery. (2025). What are the advantages and disadvantages of a twin shaft mixer? Retrieved August 10, 2025, from <https://garlway.com/faqs/what-are-the-advantages-and-disadvantages-of-a-twin-shaft-mixer>

12. Dudin, V.Yu., & Hovorukha, V.B. (2023). Obgruntuvannya konstruktyvno-tekhnolohichnykh parametiv strichkovo-hvyntovoho zmishuvacha syppykh kormiv [Justification of constructive-technological parameters of ribbon-screw feed mixer]. *Konstruiuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya silskohospodarskykh mashyn*, 53, 112–121. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.112-121>

13. KUHN. (2025). Manufacturer of agricultural equipment. Official website. Retrieved August 10, 2025, from <https://www.kuhn.ua/>



14. Trioliet. (2025). Manufacturer of feeding equipment for farm animals. Official website. Retrieved August 10, 2025, from <https://www.trioliet.com/>

15. Supreme International Ltd. (2025). Manufacturer of vertical mixers and feeding equipment for farm animals. Official website. Retrieved August 10, 2025, from <https://supremeinternational.com/>

16. Highline Manufacturing. (2025). Manufacturer of agricultural equipment, including feed mixers and feed processing equipment. Official website. Retrieved August 10, 2025, from <https://www.highlinemfg.com/en-us/>

17. Jaylor. (2025). Manufacturer of TMR feed mixers. Official website. Retrieved August 10, 2025, from <https://jaylor.com/>

18. Roto-Mix. (2025). Manufacturer of livestock feed mixing equipment, compost mixers, and manure spreaders. Official website. Retrieved August 10, 2025, from <https://www.rotomix.com/>

19. NDEco. (2025). Manufacturer of livestock TMR feed mixers, including vertical and horizontal models. Official website. Retrieved August 10, 2025, from <https://ndeco.com/>

#### TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR FEED MIXING

*The article presents a comprehensive analysis of modern feed preparation systems for livestock, taking into account various types of mixers, including horizontal and vertical TMR mixers, screw, conical, and drum mixers for dry components. A classification of equipment was carried out based on the operating principle, design features of the working elements, and technological characteristics, allowing the identification of key groups of mixers depending on their purpose*

*and the scale of the farm. Special attention was given to the analysis of screw and rotor configurations, including square and round screws, as well as the staggered rotor technology, which provides more uniform feed circulation within the mixer. It was established that optimizing the geometry of screws and blades, the inclination of surfaces, and the use of cutting elements with hard-alloy coatings contributes to improved efficiency in grinding and mixing fibrous and wet feed components, reduces the formation of bridging, and ensures the production of a homogeneous mixture. The analysis demonstrated that horizontal and vertical TMR mixers provide high dosing accuracy, reduced mixing cycle time, and uniform distribution of nutrients, whereas conical and drum mixers are effective for dry and pelleted feeds, ensuring controlled mixing speed and minimizing component losses. Technological solutions that allow equipment to adapt to various physicomachanical properties of feed mixtures, including moisture content, fiber length, and particle size distribution, were also highlighted. The article outlines prospects for further research, including the improvement of vertical screw design, optimization of the placement and shape of cutting elements, integration of sensor systems for mixture homogeneity control and adaptive regulation of screw rotation speed, as well as the use of digital modeling and three-dimensional analysis of feed flow for substantiated design and efficiency prediction of new configurations. The results of the study can be used to enhance the productivity, energy efficiency, and technological reliability of feed preparation systems in modern livestock farming.*

**Keywords:** feed mixer, total mixed ration (TMR) mixers, vertical auger, auger design configurations, feed mixture homogeneity, process energy efficiency.

#### Відомості про автора

**Купчук Ігор Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК, інженерно-технологічний факультет, Вінницький національний аграрний університет (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [kupchuk.igor@i.ua](mailto:kupchuk.igor@i.ua); <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).

**Kupchuk Ihor** – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Associate Professor of the Department of Engineering Mechanics and Technological Processes in the Agricultural Industry, Faculty of Engineering and Technology, Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonychna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [kupchuk.igor@i.ua](mailto:kupchuk.igor@i.ua); <http://orcid.org/0000-0002-2973-6914>).