

УДК 631.363.2

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.187-194](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.187-194)**Р. В. Кісільов**, доц., канд. техн. наук, **П. Г. Лузан**, доц., канд. техн. наук,**В. В. Амосов**, доц., канд. техн. наук, **М. О. Васильковський***Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: ruslan_vik@ukr.net, luzanpg@ukr.net, v_vas_a@ukr.net, golkercozes@gmail.com*

Дослідження впливу конструктивних параметрів змішувача на якість приготування кормової суміші

У статті наведено експериментальні дослідження вдосконаленого лопатевого змішувача для приготування повноцінних кормових сумішей для великої рогатої худоби. В результаті цих досліджень визначено діапазон раціональних значень, за якого досягається підвищення ефективності роботи досліджуваного лопатевого змішувача та оптимізуються енергетичні витрати на привід мішалки. Побудовано графічні залежності, що ілюструють вплив геометричних і кінематичних параметрів на ступінь однорідності змішування кормів і рівень енергоспоживання приводу.

змішувач кормів, кормова суміш, добовий раціон, зоотехнічні вимоги, тваринництво, однорідність кормосуміші

Постановка проблеми. Молочне та м'ясне скотарство в Україні є однією з ключових і найважливіших галузей тваринництва, яка забезпечує понад 95% виробництва коров'ячого молока та близько 50-60% яловичини. З огляду на постійне зростання попиту на якісне молоко, яловичину та продукти їх переробки на світовому ринку, дана галузь має вагоме економічне значення для подальшого розвитку тваринництва в нашій країні. У загальному процесі виробництва продукції тваринництва ключову роль відіграють корми. Проте їхня якість залишається досить низькою, а обсяги виробництва - недостатні. При цьому частка кормів у собівартості молока та яловичини перевищує 50% усіх витрат.

У більшості господарств України витрати кормів на виробництво 1 ц молока становлять 50-65%. У провідних господарствах цей показник на 20-35% нижчий, а собівартість 1 ц кормових одиниць - менша на 18-20%.

Зниження витрат на виробництво кормів досягається шляхом підвищення врожайності та якості кормових культур, їх раціонального використання, покращення умов зберігання, належної підготовки до згодовування та мінімізації втрат. Водночас, за нинішнього рівня виробництва молочної продукції витрати кормів перевищують встановлені нормативи на 17-28%.

Останніми роками як у країнах Європи, так і в Україні запроваджено більш жорсткі вимоги до якості виробництва молока, яловичини та продуктів їх переробки. Це зумовлює необхідність суттєвого прискорення впровадження інтенсивних технологій підготовки кормів до згодовування, а також приготування збалансованих і повноцінних кормових сумішей.

Такі суміші мають містити збагачувальні компоненти, вітаміни, ферменти, біостимулятори, транквілізатори та лікувально-профілактичні засоби. Для цього необхідне застосування сучасної техніки нового покоління, комплексної механізації й автоматизації процесів приготування кормів [1].

Узагальнений аналіз традиційних машин і технічних засобів для приготування збалансованих кормових сумішей для великої рогатої худоби показав, що наявні змішувачі не повністю відповідають вимогам щодо забезпечення належної якості вологих кормосумішей та мають низку недоліків. Зокрема, конструкції мобільних змішувачів

перевищують нормативні показники питомої матеріалоемності у 1,5...2 рази, а витрати енергії на привід робочих органів - у 3...4 рази. Подібні виявлені недоліки істотно обмежують можливості застосування таких змішувачів на фермах і комплексах ВРХ, а їх використання у потокових лініях є малоефективним. Саме це зумовлює актуальність питання підвищення ефективності роботи та технічного рівня змішувачів для приготування вологих кормосумішей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В теорії змішування основне місце займають питання, що направлені на дослідження самого механізму сумішоутворення в залежності від конструкції робочих органів. Більш ґрунтовно до теоретичного та експериментального обґрунтування процесів інтенсифікації гравітаційних барабанних змішувачів безперервної дії зі згладжувальним ефектом для приготування повнораціональних вологих кормових сумішей на фермах ВРХ підійшов Фурса І.І. [2]. У циклі своїх досліджень він уперше всебічно розглянув процес змішування у всій його складності та взаємозв'язках, врахувавши закономірності впливу псевдорозрихлення активним прутковим бітером і конвеєрного змішувача безперервної дії зі згладжувальною здатністю. Крім того, досліджено вплив нерівномірності подачі дозуючих технічних засобів на ефективність приготування вологих кормових сумішей у змішувачах безперервної дії. Дослідженнями різних циркуляційних змішувачів шнекового типу займалися Вагін Б.І. та Ревенко І.І. [3]. Названі автори обґрунтували ефективність застосування багатошнекових змішувачів, як стаціонарних, так і пересувних, для приготування сипких і вологих кормових сумішей. У результаті теоретичних та експериментальних досліджень були встановлені оптимальні конструктивні параметри та режими роботи горизонтальних і вертикальних шнекових змішувачів. Також в їхніх працях було розглянуто конструкції двох-, трьох-, чотирьох- та шестишнекових змішувачів. За результатами аналізу встановлено, що найбільш ефективними за продуктивністю та якістю змішування вологих кормових сумішей є змішувачі з горизонтальними чотирьоххвальними шнеками, оснащеними ножами. Водночас доведено, що трьоххвальні змішувачі відрізняються відносно низькою енерго- та матеріалоемністю. Дослідження Кукти Г.М. [4, 5] показують, що найбільш ефективні у порівнянні зі шнековими змішувачами є лопатеві, бітерні та комбіновані стрічково-лопатеві. При цьому, вони відмічають складність проходження технологічного процесу, який має свої істотні відмінності. Тому в теоретичних дослідженнях особливо важливого значення набуває фізико-механічна сторона самого процесу змішування кормів та математичне моделювання властивостей складних сипучих матеріалів. Оскільки складові компоненти суміші відрізняються фізико-механічними властивостями та характеризуються підвищеною вологістю, виникає потреба у забезпеченні відповідного впливу робочих органів. Це вимагає обґрунтованого вибору форми атакуючої поверхні лопатей, їхніх розмірів, кута встановлення, кроку та режимів роботи, що безпосередньо впливають на ефективність процесу сумішоутворення й продуктивність змішувача. Дослідження також засвідчили, що однорідність суміші досягається швидше, якщо на частки компонентів діють більші імпульси сил лопатей в осьовому та поперечному перерізах змішувача, а також створюється ефект псевдорозрихлення маси [6, 7].

Постановка завдання. Метою цієї статті є суттєве підвищення якості та вдосконалення процесу змішування різних компонентів корму шляхом застосування нової конструкції плоско-лопатевого змішувача з послідовним обґрунтуванням конструктивно-кінематичних параметрів.

Виклад основного матеріалу. Висока ефективність процесу повного механічного змішування заздалегідь підготовлених компонентів настає завдяки

невпорядкованому перерозподілу часток під дією активних зовнішніх сил робочих елементів змішувача, що забезпечує відповідність зоотехнічним вимогам щодо характерного вмісту вибраних компонентів у всій фракції суміші згідно з розробленим рецептом добового раціону для великої рогатої худоби (ВРХ) (рис. 1).

Як правило, у змішувачах що мають досить досконалі конструкції, масообмін між потоками встановлених компонентів суміші відбувається за рахунок стійкого вирівнювання їх концентрації в загальному об'ємі завдяки збільшенню кількості зіткнень, використанню складніших траєкторій руху та більшої кількості перетинів порівняно з традиційними змішувачами (рис. 2) [8].

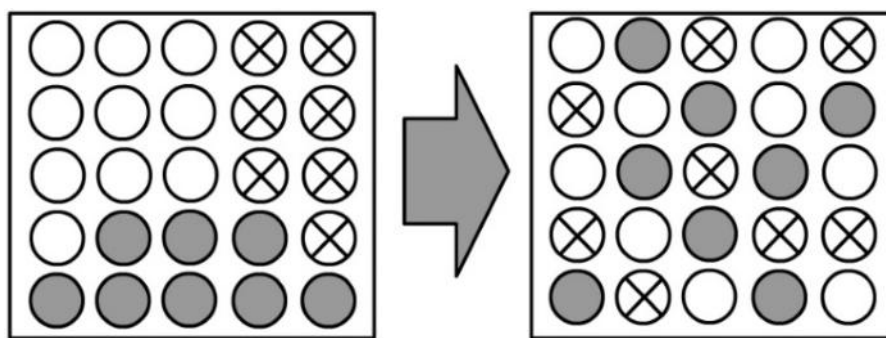
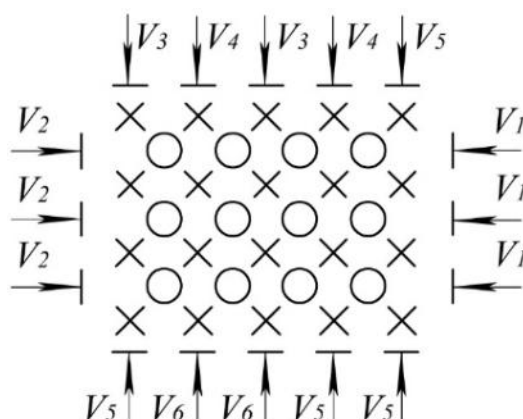


Рисунок 1 – Характерний стан повного змішування та утворення повнораціонної суміші шляхом ефективного перерозподілу дискретних часток враховуючи їх співвідношення

Джерело: розроблено авторами



$V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ – сформований напрямок та швидкість активного руху (осьової, кругової і відцентрової) підготовлених компонентів суміші під дією плоских лопатей і пальців

Рисунок 2 – Вигляд графічної схеми запропонованого процесу сумішоутворення.

Джерело: розроблено авторами

Найбільший вплив на якість приготування кормових сумішей та рівень енергетичних витрат справляє безпосередньо процес змішування, що протікає у бункері змішувача. На його перебіг істотно впливають такі чинники, як співвідношення питомої подачі й фізико-механічні властивості компонентів, стан сировини, нерівномірність дозування підготовлених компонентів, геометричні та кінематичні параметри мішалки, а також тривалість змішування.

За результатами теоретичного аналізу та проведених експериментальних досліджень визначено найбільш значущі та впливові фактори, що активно діють на

процес змішування компонентів корму, а саме: частота обертання валу мішалки n , потім ширина b , висота h та кут нахилу лопаті відносно осі валу α , крок розміщення лопатей S , а також тривалість процесу змішування t .

З метою визначення впливу основних факторів на цільову функцію, обґрунтування раціональних параметрів мішалки та отримання якісної оцінки процесу сумішоутворення запропоновано конструкцію плоско-лопатевого змішувача (рис. 3).

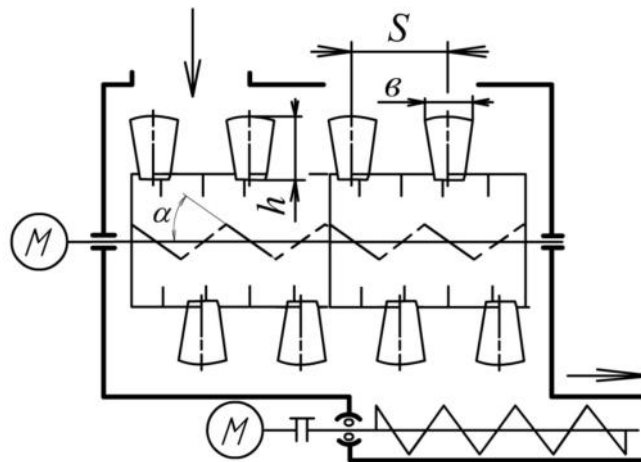


Рисунок 3 – Технологічна схема плоско-лопатевого змішувача

Джерело: розроблено авторами

Процес приготування збалансованих повнораціонних сумішей відбувається наступним чином. Під час роботи змішувача з удосконаленою мішалкою віддозовані компоненти пошарово подаються збірним транспортером в бункер, де потрапляють під дію плоских лопатей та радіальних пальців. Починається конвективне змішування, а саме поступове вирівнювання потоку та перерозподіл груп компонентів уздовж всього об'єму бункера. Лопаті, які жорстко закріплені до конструкції верхнього ряду з правим кутом нахилу відокремлюють частину компонентів корму по всій ширині лопаті і активно переміщують матеріал праворуч в радіальному, а також круговому і осьовому напрямках, а потім другий ряд вже з лівим кутом нахилу - ліворуч і далі цей процес повторюється. При цьому частки кожного компонента потрапляють в зону активної взаємодії складних рухів, перетинів та постійних зіткнень і періодично переміщуються з одного сформованого потоку до іншого, що прискорює їх перерозподіл у мікрооб'ємах, тобто триває процес дифузійного змішування.

Оцінку ефективної роботи запропонованого змішувача проводили перевіркою якості виконання процесу сумішоутворення та характерними витратами потужності на привід мішалки N . Ступінь змішування компонентів контролювали аналізом відібраних проб [9, 10].

Якість кормів визначали використовуючи коефіцієнт неоднорідності V_n за допомогою стандартної методики [11, 12, 13], тобто шляхом розподілу контрольного компонента по завершенню процесу в 10 пробах, відібраних пробовідбірником, за наступним виразом:

$$V_n = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (1)$$

де S - значення середньоквадратичного відхилення контрольного компонента за наслідками досвіду;

$\bar{x}$ - середньоарифметичний показник вмісту контрольного компонента у всіх пробах.

Експериментальні дослідження проводилися за одночасної зміни чотирьох найбільш впливових чинників $V_n = f(b, \alpha, n, t)$ у відповідних межах параметричних обмежень.

За рахунок використання прикладної програми STATISTICA 6.0 ми планували експериментальні дослідження та отримали графічні залежності впливу вище встановлених чинників на якісні і енергетичні показники процесу приготування збалансованих сумішей (рис. 4-7).

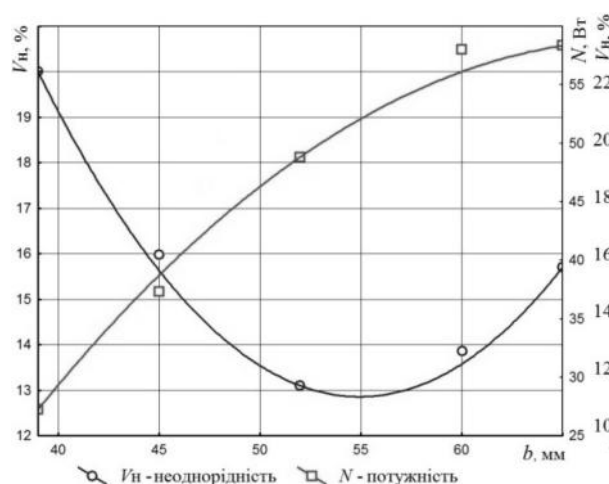


Рисунок 4 – Вплив ширини лопаті на ефект змішування компонентів і потужність приводу

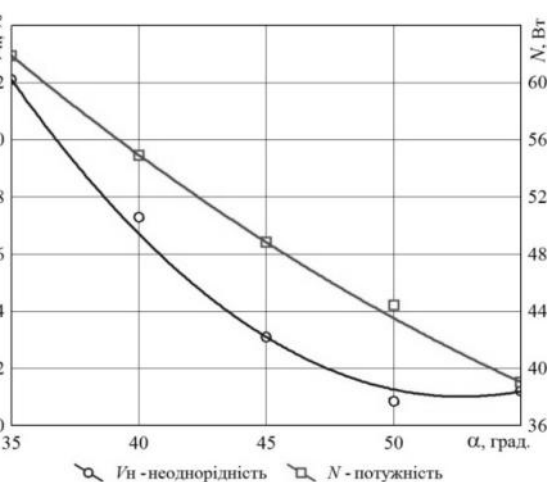


Рисунок 5 – Залежність кута нахилу лопаті на ефект сумішоутворення та потужність приводу

Джерело: розроблено авторами

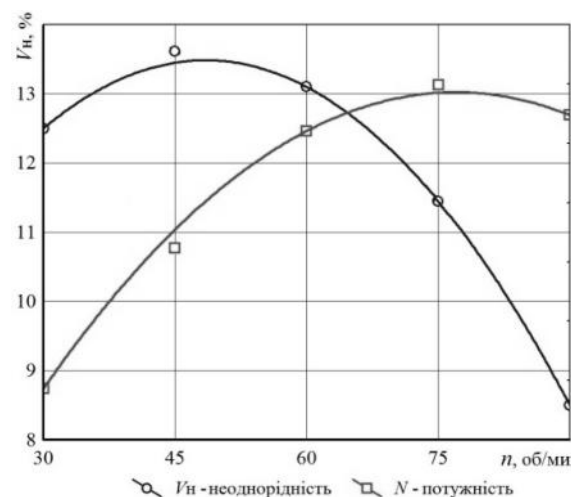


Рисунок 6 – Вплив частоти обертання мішалки на ефект змішування і потужність приводу

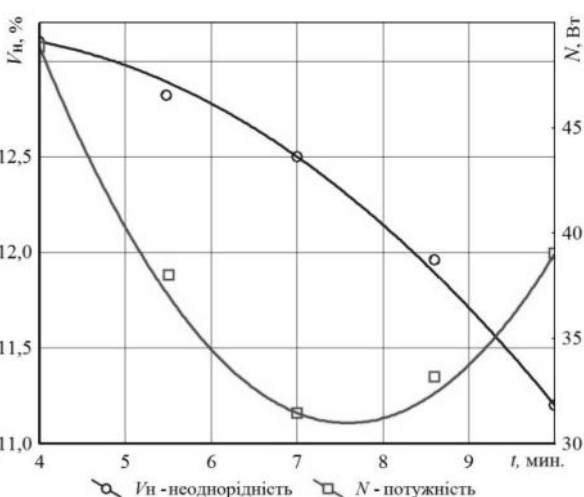


Рисунок 7 - Вплив тривалості змішування на ефект сумішоутворення

Джерело: розроблено авторами

Крім того, було побудовано графіки стабільності змішування з метою аналізу взаємного впливу тривалості процесу на ступінь однорідності кормової суміші (рис. 8). Отримані залежності дозволили додатково підтвердити висновки, зроблені за результатами побудованих графіків щодо раціональних меж коливання кута нахилу лопаті $\alpha = 45 \dots 50^\circ$ у взаємодії з кожним із досліджуваних факторів.

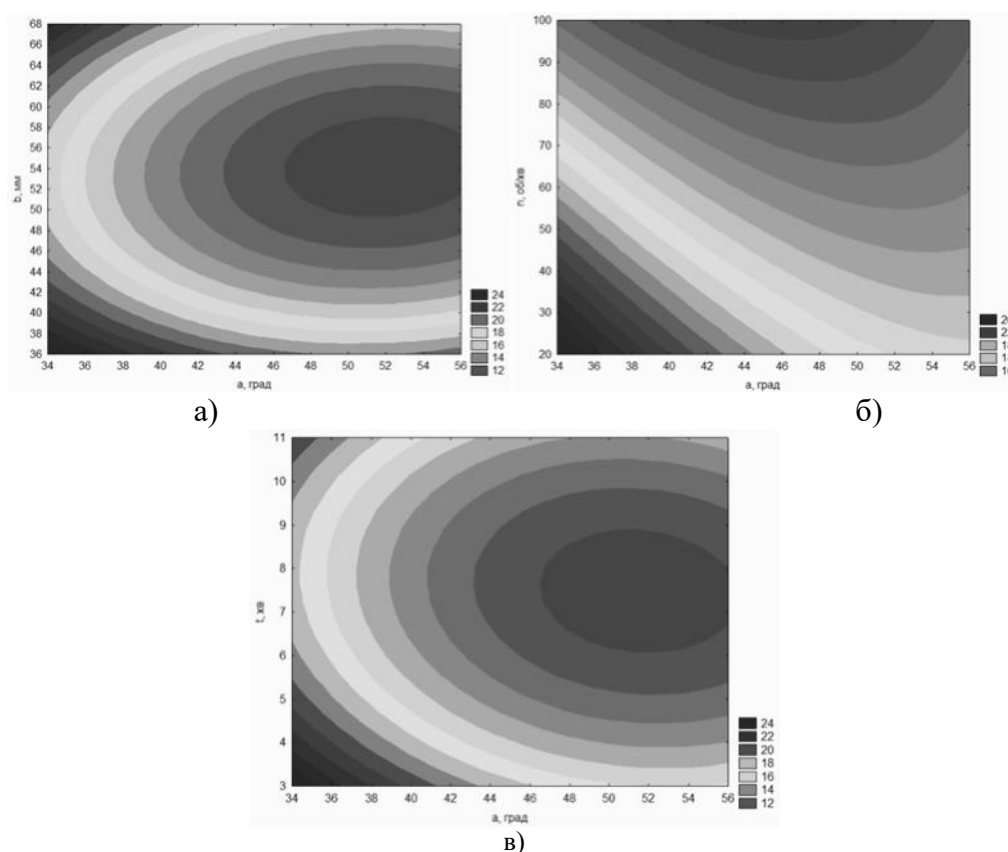


Рисунок 8. Графіки ліній стабільності взаємного впливу кута нахилу лопатей разом з іншими факторами на ефект змішування кормів

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Проведені експериментальні дослідження показали, що обґрунтована технологічна схема комбінованого плоско-лопатевого змішувача кормів дозволяє реалізувати процес приготування збалансованих повнораціонних кормосумішей для ВРХ до регламентованого ступеню.

Завдяки дослідженням обґрунтовані наступні раціональні параметри: ширина лопаті - 45 мм, кут нахилу до вісі валу - 50^0 , частота обертання валу мішалки - 90 об/хв. та тривалість процесу сумішоутворення 7 хв. Враховуючи значення параметрів конструкція розробленого змішувача забезпечує однорідність суміші на рівні 92% (згідно зоотехнічних вимог показник однорідності для ВРХ складає 86%). [14]. Тому подальше використання запропонованої конструкції лопатевого змішувача є доцільним та ефективним.

Список літератури

1. Ібатуллін І. І., Мельник Ю. Ф., Отченашко В. В. *Практикум з годівлі сільськогосподарських тварин* : навч. посіб. / за ред. акад. НААН України І. І. Ібатулліна. Київ, 2015. 422 с.
2. Ревенко І. І., Хмельовський В. С., Заболотько О. О. *Машини і обладнання для тваринництва* : електрон. підручник. Київ : ДУ «Науково-методичний центр вищої та фахової передвищої освіти», 2019.
3. Кісільов Р. В. Теоретичні дослідження процесу змішування кормів стрічково-лопатевим змішувачем. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація* : зб. наук. праць. Кропивницький : КНТУ, 2011. Вип. 24, ч. 1. С. 167–175.
4. Лазаревич А. П. Однотипові кормосуміші для молочної худоби. *Тваринництво України*. 2007. № 4. С. 33–35.
5. Кісільов Р. В., Матвеев К. Д., Лузан П. Г., Матвеева В. О. Аналіз конструктивно-технологічних і кінематичних параметрів змішування кормів для ВРХ. *Конструювання, виробництво та*

- експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кропивницький : КНТУ, 2011. Вип. 41, ч. 2. С. 167–173.
6. Хмельовський В. С. Оцінка рівномірності змішування кормів. *Зб. тез доп. XII Міжнар. наук.-практ. конф.* Київ : НУБіП України, 2017. С. 77–78.
 7. Ревенко І., Ревенко Ю. Якість приготування та ефективність використання концентрованих та комбінованих кормів. *MOTROL*. Lublin-Rzeszow, 2013. Вип. 3. С. 356–361.
 8. Науменко О. А., Бойко І. Г., Грідасов В. І., Дзюба А. І. *Проектування технологій і технічних засобів для тваринництва* / за ред. О. П. Скороика, В. М. Полупанова. Харків : ХНТУСГ, 2009. 429 с.
 9. Шевченко І. А., Павліченко В. М., Лиходід В. В., Забудченко В. М. Аналіз конструкцій технічних засобів для виробництва вологих високозасвоєваних кормів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2013. Вип. 43. С. 179–185.
 10. Ревенко І. І., Брагінець М. В., Ребенко В. І. *Машини та обладнання для тваринництва*. Київ : Кондор, 2009. 730 с.
 11. Шацький В. В., Мілько Д. А., Болтянський Б. В., Коломієць С. М., Семенцов В. І. Якість змішування компонентів раціону – основа підвищення продуктивності тварин. *Зб. наук. праць Таврійського держ. агротехнол. ун-ту*. Мелітополь, 2013. Вип. 1, т. 3. С. 43–50.
 12. Шацький В. В. Математичне моделювання динамічності щільності та якості кормової суміші для тварин. *Наук. вісник Таврійського держ. агротехнол. ун-ту*. Мелітополь, 2012. Вип. 2, т. 2. С. 3–19.
 13. Шабельник Б. П. *Теорія та розрахунок машин для тваринництва* : монографія. Харків : ХДТУСГ, 2002. 216 с.
 14. Черновол М. І., Свіренєв М. О., Кісільов Р. В. Приготування кормових сумішей комбінованим змішувачем. *Вісник аграрної науки*. 2018. № 2. С. 54–59.

References

1. Ibatullin, I. I., Melnyk, Yu. F., & Otchenashko, V. V. (2015). *Praktykum z hodivli silskohospodarskykh tvaryn* [Workshop on feeding farm animals] (I. I. Ibatullin, Ed.). Kyiv. [in Ukrainian].
2. Revenko, I. I., Khmelovskiy, V. S., & Zabolotko, O. O. (2019). *Mashyny i obladnannia dlia tvarynnystva* [Machines and equipment for animal husbandry]. Kyiv: State Scientific and Methodological Center for Higher and Professional Pre-Higher Education. [in Ukrainian].
3. Kisilov, R. V. (2011). Teoretychni doslidzhennia protsesu zmishuvannia kormiv strichkovo-lopatevym zmishuvachem [Theoretical studies of the feed mixing process with a belt-blade mixer]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia: zb. nauk. prats*, 24(1), 167–175. Kropyvnytskyi: KNTU. [in Ukrainian].
4. Lazarevych, A. P. (2007). Odnotypovi kormosumishi dlia molochnoi khudoby [Uniform feed mixtures for dairy cattle]. *Tvarynnystvo Ukrainy*, 4, 33–35. [in Ukrainian].
5. Kisilov, R. V., Matvieiev, K. D., Luzan, P. H., & Matvieieva, V. O. (2011). Analiz konstruktyvno-tehnologichnykh i kinematychnykh parametriv zmishuvannia kormiv dlia VRKh [Analysis of structural-technological and kinematic parameters of feed mixing for cattle]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, 41(2), 167–173. Kropyvnytskyi: KNTU. [in Ukrainian].
6. Khmelovskiy, V. S. (2017). Otsinka rivnomirnosti zmishuvannia kormiv [Assessment of the uniformity of feed mixing]. In *Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference*, Kyiv: NUBiP of Ukraine, 77–78. [in Ukrainian].
7. Revenko, I., & Revenko, Yu. (2013). Yakist pryhotuvannia ta efektyvnist vykorystannia kontsentrovanykh ta kombinovanykh kormiv [Quality of preparation and efficiency of using concentrated and combined feeds]. *MOTROL*, 3, 356–361. Lublin–Rzeszow. [in Ukrainian].
8. Naumenko, O. A., Boiko, I. H., Hrydasov, V. I., & Dziuba, A. I. (2009). *Proiektuvannia tekhnologii i tekhnichnykh zasobiv dlia tvarynnystva* [Design of technologies and technical means for animal husbandry] (O. P. Skoryk & V. M. Polupanov, Eds.). Kharkiv: KhNTUSG. [in Ukrainian].
9. Shevchenko, I. A., Pavlichenko, V. M., Lykhodid, V. V., & Zabudchenko, V. M. (2013). Analiz konstruktsii tekhnichnykh zasobiv dlia vyrobnytstva volohykh vysokozasvoiuvanykh kormiv [Analysis of technical means designs for the production of moist, highly digestible feed]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, 43, 179–185. [in Ukrainian].
10. Revenko, I. I., Brahynets, M. V., & Rebenko, V. I. (2009). *Mashyny ta obladnannia dlia tvarynnystva* [Machines and equipment for animal husbandry]. Kyiv: Kondor. [in Ukrainian].
11. Shatskiy, V. V., Milko, D. A., Boltianskiy, B. V., Kolomiiets, S. M., & Sementsov, V. I. (2013). Yakist zmishuvannia komponentiv ratsionu – osnova pidvyshchennia produktyvnosti tvaryn [The quality of feed

- ration mixing components as the basis for increasing animal productivity]. *Zb. nauk. prats Tavriiskoho derzh. ahrotekhnol. un-tu*, 1(3), 43–50. Melitopol. [in Ukrainian].
12. Shatskyi, V. V. (2012). Matematychni modeliuvannia dynamichnosti shehlnosti ta yakosti kormovoi sumishi dlia tvaryn [Mathematical modelling of density dynamics and feed mixture quality for animals]. *Nauk. visnyk Tavriiskoho derzh. ahrotekhnol. un-tu*, 2(2), 3–19. Melitopol. [in Ukrainian].
13. Shabelnyk, B. P. (2002). *Teoriia ta rozrakhunok mashyn dlia tvarynnystva* [Theory and calculation of machines for animal husbandry]. Kharkiv: KhDTUSG. [in Ukrainian].
14. Chernovol, M. I., Sviren, M. O., & Kisilov, R. V. (2018). Pryhotuvannia kormovykh sumishei kombinovanykh zmishuvachem [Preparation of feed mixtures with a combined mixer]. *Visnyk ahramoi nauky*, 2, 54–59 [in Ukrainian].

Ruslan Kisilyov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Petro Luzan**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,

Volodymyr Amosov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykhailo Vasylovskyi**

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Research on the Influence of Mixer Design Parameters on the Quality of Feed Mixture Preparation

In connection with the transition of livestock farming to market principles, a long-term national program was developed aimed at increasing milk and beef production, reducing the cost of production, improving its quality, and comprehensive intensification of livestock farming. The main objectives of the program are to form a reliable feed base, increase its productivity and yield of grain and fodder crops, introduce modern feeding technologies, prepare feed for feeding, produce highly nutritious feed mixtures, and widely use complex mechanization and automation of production processes on farms and livestock complexes. Successful implementation of technical and breeding progress in high-yield milk and beef production primarily involves providing livestock with a sufficient amount of high-quality and biologically complete feed. Such rations must be balanced in terms of the content of organic nutrients, minerals, biologically active components, trace elements and micronutrients in accordance with the planned productivity, while maintaining the necessary level of vital activity and physiological state of the animals.

A generalized analysis of traditional machines and technical means for preparing feed mixtures for cattle showed that the existing mixers do not fully provide the necessary quality indicators in the manufacture of wet feed mixtures and have a number of significant shortcomings. In particular, the designs of mobile mixers are characterized by exceeding the regulatory indicators of specific metal content by 1.5-2 times, and energy consumption for driving the working elements by 3-4 times. Such significant shortcomings significantly limit the possibilities of their effective use on cattle farms.

The article considers a systematic approach to the technological process of mixing various components, which is presented in the form of a deterministic model of the functioning of a batch feed mixer at all stages of its operation - from loading raw materials to obtaining and unloading the finished mixture. Based on the conducted research, a technological scheme of a paddle mixer is substantiated, the design of which includes a housing with a loading neck and an unloading screw. Along the working chamber, flat blades with an appropriate pitch are rigidly fixed on the supports, ensuring mixing of the components. The lower part of the supports is equipped with radial fingers for loosening the compacted masses of the mixture in the housing. The blades are installed at the right and left angles of inclination of their working surface relative to the shaft axis, which contributes to intensive and uniform mixing.

Experimental studies have shown that the developed and substantiated technological scheme of the combined flat-blade feed mixer provides effective preparation of balanced complete feed mixtures for cattle to the degree of homogeneity established by the regulations.

During the studies, rational parameters of the mixer operation were determined: blade width - 45 mm, angle of inclination to the shaft axis - 50°, mixer shaft rotation frequency - 90 rpm, duration of the mixture formation process - 7 min. Taking into account the specified parameters, the design of the mixer provides a level of homogeneity of the feed mixture at the level of 92%.

feed mixer, feed mixture, daily ration, zootechnical requirements, livestock farming, feed mixture homogeneity

Одержано (Received) 07.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 25.08.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025