

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**ХМЕЛЬОВСЬКИЙ ВАСИЛЬ СТЕПАНОВИЧ**

УДК 636.363

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРИГОТУВАННЯ І РОЗДАВАННЯ КОРМІВ  
РОГАТИЙ ХУДОБИ**

05.05.11 «Машини і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано у Національному університеті біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант**

доктор технічних наук, професор  
**Ревенко Іван Іванович**,  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України,  
професор кафедри механізації тваринництва

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор,  
член-кореспондент НААН  
**Кравчук Володимир Іванович**,  
Державна наукова установа  
«Український науково-дослідний інститут  
прогнозування та випробування техніки  
і технологій для сільськогосподарського  
виробництва імені Леоніда Погорілого»,  
директор

доктор технічних наук, професор  
**Брагінець Микола Володимирович**,  
Харківський національний технічний університет  
сільськогосподарства імені Петра Василенка,  
професор кафедри технічних систем  
і технологій тваринництва імені Б. П. Шабельника

доктор технічних наук, доцент  
**Дмитрів Василь Тарасович**,  
Національний університет  
«Львівська політехніка»,  
професор кафедри механіки  
та автоматизації машинобудування

Захист відбудеться «19» грудня 2019 року о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.06 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України, за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України, за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «18» листопада 2019 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

І. Л. Роговський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Однією з найважливіших галузей господарського комплексу України є сільське господарство, яке на сучасному етапі відіграє важливу роль у зміцненні економіки країни, адже формує 16–22 % національного доходу, підвищенні життєвого рівня населення і вирішенні соціально-економічних проблем в сільській місцевості, оскільки є високо інтенсивним виробництвом. Забезпечити конкурентну спроможність сільського господарства на внутрішньому і зовнішньому ринках може подальший розвиток тваринництва, яке є гарантом продовольчої безпеки, задовольняє потреби населення в продуктах харчування та сприяє збереженню здоров'я нації. Механізація та автоматизація виробничих процесів у тваринництві є фундаментом галузі, тоді як їх рівень, визначає технологію виробництва. Інженерно-технічний рівень галузі тваринництва забезпечує збільшення рентабельності виробництва в 12–18, продуктивності праці в 3–4 рази. Високоякісне виробництво продукції тваринництва, зниження матеріало- та енергоємності галузі – важливі народногосподарські завдання. Їх вирішення залежить від формування і розвитку складних інтегрованих систем, які охоплюють середовище, тварин, техніку й людину. Підвищення ефективності роботи тваринницьких підприємств можна досягти шляхом збільшення обсягів виробництва кормів та покращення якості їх приготування і роздавання. Особливістю напряду механізованого приготування кормів є інтегроване застосування технічних засобів механізації та автоматизації, електроніки, створення систем управління біотехнологічними процесами. На рівні підсистеми забезпечення якості тваринницької продукції, повинна бути модель приготування та роздавання кормів і конверсії їх у продукцію. Головне завдання такої моделі полягає в оптимізації параметрів процесів та машин, які забезпечують якість приготування кормів та заданий рівень продуктивності тварин.

Аналіз годівлі тварин свідчить, що раціони з широким використанням силосу, грубих кормів, коренеплодів, зеленої маси, комбікормів і різних кормових добавок, найкраще згодовувати у складі збалансованих кормових сумішок з рівномірністю змішування не менше 85 %. Проте, існуюче кормоприготувальне устаткування реалізує витратні технології переробки коренеплодів і грубих стеблових кормів. Крім цього, у господарствах часто відсутні лінії ефективної обробки високобілкових кормів і дозованого введення макромінеральних добавок. Це не дає можливості раціонально згодовувати корми у вигляді повноцінно збалансованих кормосумішей, використання яких є основою підвищення продуктивності тварин на 9–16 % і зниження питомих витрат кормів на 7–12 %.

Відомі різні технологічні схеми переробки кормів у кормову суміш, вибір яких залежить від типорозміру тваринницького підприємства. В одних господарствах використовують окремі машини для приготування кормів до згодовування, в інших – використовують пошарове завантаження кормових компонентів у кормороздавач із умовним змішуванням при роздаванні корму.

Останнім часом, застосовують схему приготування та роздавання кормової суміші за допомогою мобільних комбінованих кормоприготувальних агрегатів. Проте, комбіновані кормоприготувальні агрегати все ще потребують всебічного вивчення та узгодження з технологіями годівлі з метою мінімізації ризиків та несприятливих наслідків їх використання.

У зв'язку з цим, актуальною проблемою є розроблення та оптимізація технологічних і технічних рішень, структури й якості функціонування процесів приготування кормів, які забезпечують високу ефективність використання кормових ресурсів та продуктивність тварин.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження за темою дисертації є частиною комплексної науково-дослідної роботи кафедри механізації тваринництва Національного університету біоресурсів і природокористування України «Обґрунтувати інтегровані технологічні процеси та технічні засоби для органічного виробництва сільськогосподарської продукції в агроєкосистемах» (номер державної реєстрації 0112U001678, у 2012–2019 рр.).

**Мета та завдання дослідження.** Мета дисертаційного дослідження – підвищення ефективності виробництва продукції тваринництва на фермах рогатої худоби, шляхом удосконалення конструкції кормоприготувальних машин і засобів роздавання, а також методів їх використання.

Відповідно до мети було передбачено виконання таких завдань:

– провести аналіз існуючих технологій годівлі великої рогатої худоби та визначити перспективні напрями їх удосконалення;

– обґрунтувати раціональні технологічні схеми та комплекти машин і обладнання для приготування і роздавання кормів, залежно від типорозміру підприємства;

– розробити модель оптимізації параметрів процесу годівлі тварин, на основі визначення впливу машин і обладнання на продуктивність тварин, за умов рівномірного подрібнення та однорідного змішування кормових компонентів;

– уточнити методику розроблення і розрахунку технологічних ліній приготування кормових сумішок тваринам, а також параметрів кормоприготувальних агрегатів;

– розробити математичні моделі функціонування мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату для визначення його раціональних параметрів, з урахуванням існуючих вимог до процесу годівлі тварин;

– розробити нові конструктивно-технологічні рішення засобів приготування та роздавання кормових сумішок, обґрунтувати їх раціональні параметри;

– провести виробничу перевірку та визначити ефективність розроблених засобів механізації забезпечення процесу годівлі рогатої худоби.

*Об'єкт дослідження* – технологічні процеси і засоби механізації приготування і роздавання кормів.

*Предмет дослідження* – встановлення закономірностей впливу параметрів мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату на ефективність і якість приготування та роздавання кормів рогатій худобі, а також обґрунтування і розроблення нових конструктивно-технічних рішень стосовно вказаних агрегатів.

**Методи дослідження:** механіки суцільного середовища та рідин, аналітичної та диференційної математики, теоретичної та аналітичної механіки, гідравліки. Експериментальні дослідження проведено із застосуванням методів теорії ймовірності, математичної статистики планування повнофакторного експерименту. Аналіз результатів експериментальних та теоретичних даних досліджень виконано із застосуванням прикладних комп'ютерних програм та систем. Лабораторні експериментальні дослідження проводились відповідно до стандартних та розроблених методик.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Вперше встановлено залежності:

- впливу рівномірності подрібнення та однорідності змішування при приготуванні та роздаванні кормів на ефективність годівлі тварин;
- рівномірності змішування від фракційного складу стеблових кормів;
- енергетичних показників процесу приготування кормових сумішок від властивостей і стану вихідних компонентів;
- діючих на корм зусиль та енергомісткості процесу змішування від геометричних параметрів бункера;
- впливу зусиль, з якими діє робочий орган на перероблювальні корми в поперечному напрямі, які впливають на спрацювання (стирання) поверхні протектора шин та міцність рами при одночасному змішуванні і транспортуванні кормів.

Визначено умови запобігання заторів та заповнення витків шнека, в процесі змішування кормів, а також обґрунтовано і розроблено метод оцінювання однорідності змішування кормових компонентів за перерозподілом вологи.

Дістали подальший розвиток:

- методика розроблення і розрахунку технологічних ліній приготування та роздавання кормових сумішок тваринам;
- методика розрахунку параметрів мобільних комбінованих кормоприготувальних агрегатів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Визначено типорозмірний ряд змішувачів-роздавачів для приготування та роздавання кормової суміші, а також, обґрунтовано їх конструктивно-технологічні параметри і технологію заготівлі кормових компонентів. Ці розробки дозволяють знизити енергетичні затрати на приготування кормової суміші до 20 %, а за рахунок підвищення якості подрібнення кормів – зменшити загальні питомі витрати на 13–14 %.

Удосконалено конструкцію та обґрунтовано параметри робочих органів мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату, що забезпечує підвищення рівномірності дозованої видачі кормової суміші. Розроблено алгоритм оптимізації при визначенні параметрів механізованих процесів

приготування і роздавання кормів, машин та агрегатів для їх реалізації, з умов ефективного використання кормів і збільшення продуктивності тварин, які можна використовувати ще на етапі проектування тваринницьких підприємств.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень передано на ТДВ «Брацлав» Вінницької області, для використання при подальшому удосконаленні існуючих кормоприготувальних машин.

Результати досліджень з математичного моделювання руху кормових компонентів поверхнями робочих органів кормоприготувального агрегату використовуються в навчальному процесі при викладанні дисциплін: «Машини та обладнання для тваринництва», «Машиновикористання в тваринництві», «Проектування технологічних процесів у тваринництві», при підготовці фахівців за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія» спеціальності 208 «Агроінженерія» освітнього ступеня «Магістр» механіко-технологічного факультету.

Виробничу перевірку мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату проведено у виробничих умовах відокремлених підрозділів Національного університету біоресурсів і природокористування України «Агрономічна дослідна станція» та «Великоснітинське навчально-дослідне господарство імені О. В. Музиченка».

**Особистий внесок здобувача.** Теоретичні та експериментальні дослідження за темою дисертації виконано автором самостійно. Постановка завдання, аналіз і трактування результатів виконано спільно з науковим консультантом та частково зі співавторами публікацій.

Автором особисто запропоновано: коефіцієнт якості кормової суміші як критерій оцінки технологічних рішень та дотримання зоотехнічних вимог, стосовно рівномірності змішування та подрібнення кормових компонентів; модель продуктивності машинного агрегату, в процесі приготування і роздавання кормової суміші тваринам; методику визначення рівномірності змішування кормових компонентів, з використанням показника вологості.

Із спільних експериментальних досліджень і публікацій, здобувачем використано, за згодою співавторів, лише власну частину результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень за темою дисертації було обговорено та схвалено на: конференціях науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів Національного університету біоресурсів і природокористування України (м. Київ, 2005–2014 рр.); науково-технічній конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (сmt Глеваха, 2007 р.); науково-технічній конференції «Аграрна інженерія в умовах глобалізації. Техніка та технічного сервісу сільськогосподарської техніки» (м. Харків, 2009 р.); науково-технічній конференції «Перспективи розвитку агропромислового комплексу в Поліському регіоні України» (м. Ніжин, 2009 р.); науково-технічній конференції «Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві» (сmt Глеваха, 2009 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми технології і механізації доїння та первинної обробки молока» (2010 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві»

(сmt Глеваха, 2011 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми механізації сільськогосподарського виробництва» (м. Київ, 2010 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві» (сmt Глеваха, 2012 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природо-користування» (м. Київ, 2013 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві» (м. Харків, 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування» (м. Київ, 2014 р.); Міжнародній науковій сесії «Інноваційні проекти в галузі технічного сервісу машин» (м. Харків, 2014 р.); науково-технічній конференції «Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві» (сmt Глеваха, 2014 р.); науково-технічній конференції «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (сmt Глеваха, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (м. Кіровоград, 2015 р.); Міжнародному семінарі-практикумі «Комбікормовий завод: від сировини до рентабельного виробництва» (в рамках 11 Міжнародної виставки «ІнтерАГРО 2015») (м. Київ, 2015 р.); семінарі «Технико-технологическое обеспечение производства молока высокого качества» (в рамках X Міжнародної агропромислової виставки «Агрофорум 2015»); XVI Міжнародній науковій конференції «Науково-технічні засади розробки, випробування та прогнозування сільськогосподарської техніки і технологій» (сmt Дослідницьке, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика годівлі сільськогосподарських тварин» (м. Київ, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології збалансованого природокористування в агропромисловому виробництві» (м. Ніжин, 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Технічне забезпечення виробництва органічної продукції та біопалив в АПК» (в рамках XXVIII Міжнародної агропромислової виставки «АГРО – 2016» (м. Київ, 2016 р.); XII Міжнародній науковій конференції «Раціональне використання енергії в техніці» (м. Київ, 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: Виклики для університетів про життя». Секція 7 «Біоінженерія та новітні технології сталого розвитку» (м. Київ, 2018 р.).

**Публікації.** Основні положення дисертації опубліковано у 71 науковій праці, з яких 14 статей у наукових фахових виданнях України, 14 статей у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 3 статті у наукових виданнях інших держав, 6 статей в інших виданнях, 18 патентів на корисну модель, 17 тез наукових доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотацій, вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 382 сторінок. Основна частина

роботи містить 120 рисунки та 16 таблиці. Список використаних джерел складається з 307 найменувань, з яких 27 латиницею.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «**Стан і проблеми механізації годівлі рогатої худоби**» проведено аналіз стану тваринництва та перспектива його розвитку; здійснено огляд сучасних технологій, які використовуються при годівлі великої рогатої худоби; розглянуто технологічні схеми підготовки і роздавання кормів на фермах великої рогатої худоби та технічні засоби механізації приготування та роздавання кормів; проведено аналіз літературної інформації стосовно досліджень вказаних процесів.

За останніх 15–20 років в Україні рівень поголів'я великої рогатої худоби зменшується, в той час як молочна продуктивність корів поступово збільшується. Така ситуація пов'язана з тим, що в багатьох господарствах застосовують сучасні технології годівлі великої рогатої худоби, які передбачають зниження втрат при заготівлі та зберіганні кормів, а також використання нових енергоощадних машин та обладнання, які виконують операції з приготування кормової суміші. Питаннями технологій годівлі тварин активно займалися: І. І. Ібатуллін, В. І. Костенко, І. П. Чумаченко, Л. А. Коропець, Т. А. Антонюк, І. І. Ільчук, М. М. Луценко, В. І. Гноєвий, В. О. Головка, О. К. Трішин, І. В. Гноєвий та ін.

Одна з технологій, впроваджена у передових тваринницьких господарствах – це круглорічно-однотипна годівля високопродуктивних корів. Вона дозволяє використовувати технічні засоби для підготовки кормів до згодовування та роздавання кормової суміші в умовах де забезпечується ритмічність з обумовленою послідовністю виконання технологічних операцій. Лише в Європі кормоприготувальне обладнання різного типу виготовляли понад 25 компаній Німеччини, Польщі, Англії, Франції, Італії, Голландії, Швеції, Фінляндії, Росії, Білорусії. Машини мають різні принципові схеми, типорозміри та способи агрегування. Кожна фірма випускає по кілька типорозмірів змішувачів-роздавачів з місткістю бункера від 3 до 45 м<sup>3</sup>. Більшість кормоприготувальних агрегатів призначені до агрегування з колісними тракторами, але вже є багато моделей самохідного виконання. У зв'язку з таким різноманіттям цих машин, багато науковців присвятили свої роботи питанням експлуатації, надійності, технічного обслуговування та зміни конструкції. У своїх наукових працях питання подрібнення та змішування кормових матеріалів вивчали: Г. М. Кукта, І. І. Ревенко, М. В. Брагінець, І. І. Фурса, В. В. Шацький, В. І. Кравчук, В. А. Ясинецький, В. В. Ткач, В. І. Зелінський, Д. М. Мілько, В. Т. Дмитрів; надійності техніки для годівлі тварин: А. В. Новицький, С. С. Карабиньош, М. І. Денисенко, В. С. Пивовар.

Процеси змішування кормових компонентів у порційних машинах та кормоприготування за допомогою мобільних комбінованих кормоприготувальних агрегатів досліджували: В. И. Передня, В. Ф. Хлистунов, В. И. Ужик, David W. Kammel, Donna M. Amaral-Phillips, Josi R. Bicudo,

Larry W. Turner. Свої роботи вони присвятили визначенню об'єму бункера, залежно від кратності годівлі тварин та вартості змішувачів різних виробників. В окремих роботах приведені дослідження часу приготування повноцінної кормової суміші. При цьому розбивають вказаний час на три етапи, які максимально відображають стан суміші, залежно від тривалості змішування. При використанні багатокомпонентних сумішок, велика увага приділяється їх складу, фізичній формі, співвідношенню грубих і концентрованих кормів тощо. При цьому, вартість добового раціону кормової суміші визначають з урахуванням кількості та вартості складових кормового рецепту, але не оцінюють вплив якості готової кормової суміші на ефективність її використання.

**Наукова проблема.** Сучасні тенденції розвитку конструкцій кормоприготувальних машин та обладнання передбачають: з одного боку, насичення засобами автоматизації і мікропроцесорної техніки, що веде до розширення функціональних можливостей машин для годівлі тварин; з другого, збільшення конструкційних розмірів і підвищення технологічних, енергетичних характеристик елементів технологічних ліній приготування та роздавання кормів тваринам. Це, в свою чергу, призводить до ускладнення технічних засобів і процесів приготування та роздавання кормової суміші тваринам, підвищення собівартості тваринницької продукції.

**Народно-господарська проблема** – підвищення конкурентоспроможності техніко-технологічного потенціалу кормоприготувальних машин та обладнання і ефективності використання біотехнічної системи виробництва тваринницької продукції.

З урахуванням означеної проблеми є підстави зробити висновок про актуальність і доцільність проведення досліджень, перспективність сформульованих мети та завдань, про правомірність обраних напрямів підвищення ефективності роботи кормоприготувальних машин, засобів роздавання кормів та вдосконалення технологічних процесів приготування і роздавання кормової суміші рогатій худобі.

У другому розділі **«Теоретичні основи приготування багатокомпонентної кормової суміші»** обґрунтовано елементи біотехнічної системи при виробництві тваринницької продукції; проаналізовано вплив різних параметрів, з урахуванням технологічних процесів підготовки кормів, на годівлю тварин; уточнено методику розрахунку продуктивності технологічних ліній для приготування кормових сумішок тваринам; обґрунтовано технологічні операції і комплекти машин та обладнання залежно від типорозміру підприємства і структури раціону, а також конструктивні рішення, які покращують процес годівлі тварин; досліджено зайнятість мобільних засобів механізації при забезпеченні процесу годівлі рогатої худоби; розглянуто принципи моделювання параметрів машинних агрегатів для процесу годівлі тварин, а також моделювання втрат молочної продуктивності тварин від забезпечення якості роботи кормоприготувальних машин та обладнання; обґрунтовано допустиме затримання виконання технологічних операцій в процесі годівлі тварин на втрати молочної продуктивності.

Згодовування кормових компонентів може здійснюватися за однією із схем: в натуральному вигляді без додаткового обробітку; доподрібнення та змішування; подрібнення і змішування. За першим варіантом реалізується схема роздільного згодовування кормових компонентів, другий та третій – дають можливість готувати кормову суміш із складових кормового раціону але з різною затратою енергетичних ресурсів.

Використання довговолокнустих кормових компонентів в натуральному вигляді при згодовуванні тваринам приводить до додаткових затрат при зберіганні та ускладнює процес роздавання цих кормів, а приготування з них кормової суміші потребує їх очищення та подрібнення. При використанні прес-підбирачів, які виконують операції підбирання та пресування кормових компонентів, споживана потужність збільшується на 1–5 %, а залежно від продуктивності та додаткових опцій машини, максимальне збільшення сягає 15 %.

При змішуванні кормових компонентів між собою, отримана суміш набуває нових властивостей, які впливають на повноту поїдання кормової суміші тваринами та підвищує її кормову цінність.

При оцінці ефективності технології приготування кормової суміші  $B_{д.к.р}$  доцільно враховувати коефіцієнт якості останньої:

$$B_{д.к.р} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot B_i + Z_{заг} + E_k \cdot k_k}{K_{к.ц}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $Y_i$  – кількість  $i$ -го кормового компоненту, кг;  $B_i$  – вартість  $i$ -го кормового компоненту, грн/кг;  $Z_{заг}$  – експлуатаційні затрати на приготування кормової суміші, грн;  $E_k$  – коефіцієнт використання капітальних вкладень (враховує рівномірний розподіл на весь термін експлуатації обладнання),  $E_k=0,15$ ;  $k_k$  – капіталовкладення, грн;  $K_{к.ц}$  – коефіцієнт якості кормової суміші (рівномірності змішування та подрібнення, при  $K_{к.ц} < 0,85$  кормова суміш не відповідає зоотехнічним вимогам).

Такий підхід дозволяє порівнювати різні технології і технічні засоби, що використовуються при годівлі тварин.

Слід зазначити, що за раціонального підходу у виразі (1) мінімізування може відбуватися за усіма складовими його чисельника.

Рівномірний розподіл кормових компонентів у відсотках до денної норми видачі викликано тим, що при будь-якій кратності годівлі, збільшення одного з разових об'ємів кормової суміші, потребує збільшення об'єму бункера машин, наприклад, мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату або стаціонарного змішувача.

Для приготування та роздавання кормів на фермах з поголів'ям до 10 голів великої рогатої худоби доцільно використовувати малопродуктивну техніку з енергоприводом та частковим виконанням ручних операцій, 11–35 голів – самогодівниці, механізовані лінії з використанням малопродуктивної техніки з енергоприводом (рис. 1). Для поголів'я 36–50 голів дійного стада та при середній продуктивності тварин не менше 5500 кг молока

за рік процеси приготування та роздавання кормів можуть забезпечити самогодівниці та мобільні комбіновані кормоприготувальні агрегати. Приготування та роздавання кормових сумішок для 51–400 голів – забезпечують мобільні комбіновані кормоприготувальні агрегати з видачею суміші на кормові столи. Для поголів'я більше 400 голів доцільним є застосування стаціонарних кормоприготувальних об'єктів та роздавачів кормової суміші або мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату. Більше 800 голів – є перспективним застосування стаціонарних кормоприготувальних об'єктів у поєднанні із кормороздавачами, як виняток можна використовувати мобільні комбіновані кормоприготувальні агрегати з рівномірною видачею суміші на кормові столи.

В перспективі засоби механізації обслуговування рогатої худоби при годівлі (враховуючи тенденції розвитку тваринництва), повинні мати не лише високі техніко-технологічні та економічні показники, а й широкий типорозмірний ряд у мобільному та стаціонарному виконаннях. За конструктивною особливістю засоби механізації повинні бути розраховані на господарства з поголів'ям від 25 до 400 і більше тварин. Використання самогодівниці для згодовування великої рогатої худоби зелених, грубих, силосованих кормів та кормових сумішок за безприв'язного способу утримання на вигульних майданчиках дозволяє підвищити продуктивність праці у порівнянні з ручною роздачею кормів у 3–4 рази. Одна годівниця може обслуговувати максимум 30–40 голів.

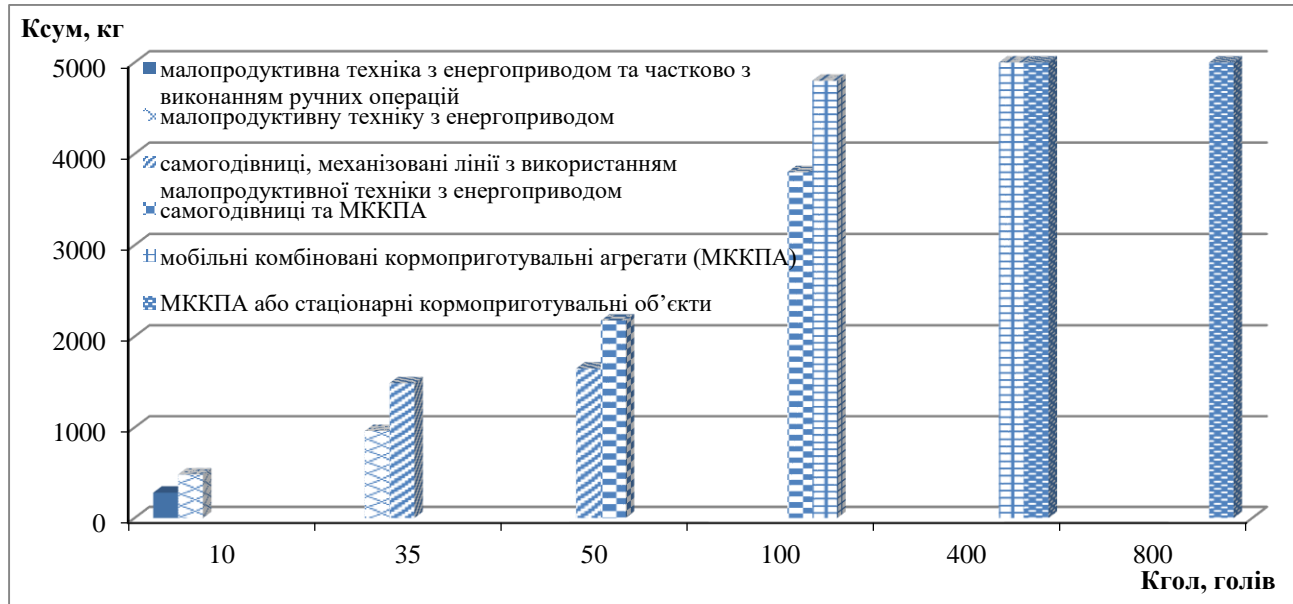


Рис. 1. Порівняльна оцінка варіантів засобів механізації приготування та роздавання кормової суміші залежно від добової кількості кормів  $K_{\text{сум}}$  та поголів'я тварин  $K_{\text{гол}}$

Ефективність використання мобільних комбінованих кормоприготувальних агрегатів при виконанні технологічних процесів, пов'язаних з годівлею тварин, залежить від зайнятості агрегату. Теоретично, варіантів з використанням мобільного комбінованого кормоприготувального

агрегату для процесів приготування і роздавання кормової суміші тваринам може бути багато, але в умовах виробництва достатньо розглянути тільки два з них (рис. 2 та рис. 3).

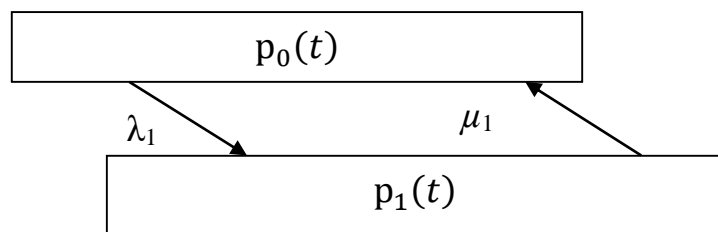


Рис. 2. Схема процесу приготування та роздавання кормової суміші при роботі за зміщеним графіком:  $p_0$  – ймовірність завантаження кормових компонентів, приготування кормової суміші у мобільному комбінованому кормоприготувальному агрегаті та її транспортування;  $p_1$  – ймовірність роздавання суміші тваринам

Одним з них є використання мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату в процесі приготування кормів та їх роздавання в одному приміщенні (рис. 2). При годівлі тварин з використанням мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату за зміщеним графіком, виникає масив очікувань тварин в інших приміщеннях на кормову суміш, при цьому, система працює в режимі вільний – зайнятий, стосовно обслуговування кожного приміщення.

Візуальне сприйняття проходження процесу приготування та роздавання кормів відображає граф (рис. 2).

Ймовірність виконання процесу приготування та роздавання кормів тваринам  $B_{min}$  можна визначити як

$$B_{min} = 1 - P_{від}, \quad (2)$$

де  $P_{від}$  – ймовірність того, що процес не буде виконано вчасно,  $P_{від} = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i}$ ;  $\lambda_i$  – інтенсивність потоку разової потреби у кормовій суміші ( $i=1, 2, \dots, n$ );  $\mu_i$  – інтенсивність роздавання кормової суміші тваринам ( $i=1, 2, \dots, n$ ).

Виразене у відсотках виконання процесу приготування та роздавання кормів може характеризувати  $Y_{mn}$  точність (якість) технологічного процесу:

$$Y_{mn} = (1 - P_{від}) \times 100 \%. \quad (3)$$

Процес приготування та роздавання кормів протікає як в часі згідно розпорядку роботи ферми ( $t$ ), так і в заданому діапазоні зоотехнічних вимог ( $t_{розд}$ ) обслуговування тварин у приміщенні. Диференційні рівняння Колмогорова, що характеризують ймовірність переходу із стану в стан мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату, можна подати таким чином:

– при завантаженні кормових компонентів:

$$\frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda_1 p_0 + \mu_1 p_1 \quad p_0 = \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} + \frac{1}{e^{(\lambda_1 + \mu_1)t}}, \quad (4)$$

– при роздаванні кормової суміші:

$$\frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda_1 p_0 - \mu_1 p_1 \quad p_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} + \frac{1}{e^{(\lambda_1 + \mu_1)t}}. \quad (5)$$

Інтенсивність  $\lambda_I$  потоку разової потреби у кормовій суміші щодо однієї тваринницької групи (приміщення) характеризується відношенням

$$\lambda_I = 1/t_n,$$

де  $t_n$  – затрати часу на забезпечення годівлі тварин в одному приміщенні, год:

$$t_n = f(t_{зав}, t_{мпер}, t_{нпуз}, t_{мр}, t_{розд}, t_{мх});$$

де  $t_{зав}$  – час завантаження бункера кормовими компонентами, год;  $t_{мпер}$  – час руху агрегату між місцями зберігання кормових компонентів на кормовому майдані, год;  $t_{нпуз}$  – час, що припадає на приготування кормової суміші, год;  $t_{мр}$  – час руху агрегату від кормового майданчика до місця роздавання, год;  $t_{розд}$  – час затрачений на роздавання кормової суміші, год;  $t_{мх}$  – час руху агрегату від місця роздавання (або місця відстоювання) до кормового майданчика, год.

За умови своєчасного обслуговування тварин інтенсивність  $\mu_i$  роздавання кормової суміші становить:

$$\mu_I = 1/t_{розд}.$$

Згідно (4) та (5) вірогідність обслуговування тварин щодо виконання операцій з урахуванням інтенсивності потоку разової потреби кормової суміші:

– при завантаженні та приготуванні кормових компонентів:

$$p_0 = \frac{1/t_{розд}}{1/t_n + 1/t_{розд}} + \frac{1}{e^{(1/t_n + 1/t_{розд})t}}; \quad (6)$$

– при роздаванні кормової суміші:

$$p_1 = \frac{1/t_n}{1/t_n + 1/t_{розд}} + \frac{1}{e^{(1/t_n + 1/t_{розд})t}}.$$

Інший варіант використання мобільного комбінованого кормо-приготувального агрегату стосується приготування кількості корму, якої буде достатньо для годівлі тварин у різних приміщеннях. При цьому, при завантаженні та приготуванні кормової суміші в очікуванні на отримання корму, знаходяться тварини в першому та другому приміщеннях.

Відповідно до графу (рис. 3), забезпечення годівлі у двох приміщеннях описує система диференційних рівнянь Колмогорова:

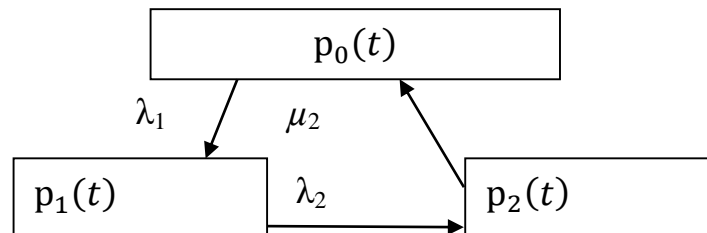


Рис. 3. Структурна схема процесу приготування та роздавання кормової суміші:  $p_0$  – ймовірність завантаження кормових компонентів приготування кормової суміші у мобільних комбінованих кормоприготувальних агрегатів та її транспортування;  $p_1$  – ймовірність роздавання суміші тваринам першого приміщення;  $p_2$  – ймовірність роздавання суміші тваринам другого приміщення

– при завантаженні та приготуванні кормових компонентів:

$$\frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda_1 p_0 + \mu_2 p_2;$$

– при роздаванні кормової суміші у першому приміщенні:

$$\frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda_1 p_0 - \lambda_2 p_1; \quad (7)$$

– при роздаванні кормової суміші у другому приміщенні:

$$\frac{dp_2(t)}{dt} = \lambda_2 p_1 - \mu_2 p_2.$$

В разі обслуговування одним кормоприготувальним агрегатом двох та більше тваринницьких приміщень, інтенсивність потоку вимог на обслуговування становить:

$$\lambda_1 = 1/t_{п1}, \text{ та } \lambda_2 = 1/t_{п2},$$

де  $t_{п1}$ ,  $t_{п2}$  – затрати часу на забезпечення годівлі тварин відповідно у першому та другому приміщеннях, год.

Час на забезпечення годівлі тварин в приміщенні визначають залежно від технології приготування та роздавання кормів,

– для першого приміщення  $t_{п1} = t_{зав} + t_{тпер} + t_{приг} + t_{тр} + t_{розд1}$ ;

– для другого приміщення  $t_{п2} = t_{п1} + t_{розд2} + t_{тх}$ ,

де  $t_{п1}$  – час руху агрегату від першого до наступного приміщення, год.

Вирішенням рівнянь системи (7) одержано такі вирази вірогідності:

– завантаження кормових компонентів:

$$p_0 = \frac{t_{п1}}{t_{п2} + t_{п1} + t_{розд}};$$

– роздавання кормової суміші у першому приміщенні:

$$p_1 = \frac{t_{п2}}{t_{п2} + t_{п1} + t_{розд}}; \quad (8)$$

– роздавання кормової суміші у другому приміщенні:

$$p_2 = \frac{t_{розд}}{t_{п2} + t_{п1} + t_{розд}}.$$

Спільна робота мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату та навантажувальних засобів в системі масового обслуговування характеризується різними кількісними показниками, серед яких є:

– число зайнятих навантажувальних агрегатів,  $n_{нав}$ :

$$n_{нав} = \frac{t_{зав}}{t_{тр} + t_{зав} + t_{тпер} + t_{приг} + t_{тх} + t_{розд}}; \quad (9)$$

– коефіцієнт простою навантажувального агрегату  $K_{пр нав}$ :

$$K_{пр нав} = \frac{t_{тр} + t_{тпер} + t_{приг} + t_{тх} + t_{розд}}{t_{тр} + t_{зав} + t_{тпер} + t_{приг} + t_{тх} + t_{розд}}. \quad (10)$$

Отримані результати дають можливість визначати перелік обладнання, залежно від технології годівлі тварин та їх кількості, яке максимально відповідало б вимогам приготування та роздавання кормів.

Приготування кормів у порційному змішувачі розглядали на основі моделі «Теорії подібності». З певною послідовністю кормові компоненти почергово завантажують у бункер-змішувач з об'ємом  $V$ , де перший компонент зі своїми фізико-механічними властивостями (масою  $m_0$  та об'ємом  $V_0$ ) змішується з наступним в продовж певного часу, поступово «розчиняючись»

один в одному. При цьому частинки кормових компонентів повинні бути рівномірно розподілені в усьому просторі  $V$  змішувача, внаслідок чого утворюють однорідну кормову суміш, яка набуває інших властивостей, відмінних від початкових властивостей компонентів і розцінюється при подальшому змішуванні як новий компонент, з яким змішується наступний. Отже, в порційних змішувачах слід розцінювати процес приготування багатокомпонентної кормової суміші, як двокомпонентної (однорідна суміш з попередніх кормових компонентів та наступний компонент).

Процес змішування – це перехідний стан, який характеризується зміною щільності кожного кормового компоненту  $\frac{m_0}{V_0}$ , відповідно до концентрації його у суміші (бункері)  $\frac{m_0}{V}$ .

Суттєвий вплив на тривалість та якість змішування має швидкість протікання процесу змішування

$$\vartheta_{(m)} = \frac{\left(\frac{m_0}{V_0} - \frac{m_0}{V}\right)}{t}.$$

Швидкість змішування  $\vartheta_{(m)}$  обумовлена переходом від щільності корму до його рівномірного розподілу (концентрації) в бункері  $V$ , звідси  $V=nV_0$ . Виразимо  $V_0$  та  $m_0$  через  $\lambda_k^3$  та  $\mu_k$

$$\mu_k \left( \frac{n\lambda_k^3 - \lambda_k^3}{\lambda_k^3 \cdot n\lambda_k^3} \right) = \frac{(n-1)\mu_k}{n\lambda_k^3}, \quad (11)$$

де  $\mu_k$  – маса кормових компонентів, кг;  $\lambda_k$  – довжини часток кормових компонентів, м;  $n$  – кількість кормових компонентів у складі кормової суміші;  $t$  – час змішування, с.

Швидкість зміни щільності компонентів в суміші  $\vartheta_{(m)}$ , а відповідно і зміна концентрації компоненту в об'ємі, становить:

$$\vartheta_{(m)} = \frac{(n-1)\mu_k}{n\lambda_k^3 \cdot t} \quad \text{або} \quad \frac{\gamma}{t} = \frac{(n-1)\mu_k}{n\lambda_k^3 \cdot t},$$

Де  $\frac{\gamma}{t}$  – швидкість зміни щільності компонентів в суміші,  $\frac{\text{кг/м}^3}{\text{с}}$ .

Робота на перемішування компонентів має вираз

$$A = \frac{(n-1)\mu_k}{n\lambda_k^3 \cdot t} \cdot \frac{\lambda_k^3 \cdot \lambda_k \cdot \lambda_k}{t} = \frac{(n-1)\mu_k \lambda_k^2}{n \cdot t^2}. \quad (12)$$

Аналіз рівняння (12) свідчить, що швидкість  $\vartheta_{(m)}$  залежить від групи факторів: конструкції бункера, режимних параметрів тощо, а також від фізико-механічних властивостей кормових компонентів.

Важливим чинником в отриманні якісної кормової суміші є час змішування компонентів між собою

$$t = \sqrt{K_{vp}} \cdot \sqrt{\gamma \cdot \frac{V_1 \cdot V_2}{V_1 + V_2}}, \quad \text{або} \quad t = \sqrt{K_{vp} \cdot \gamma \cdot \frac{\prod_i^n V_i}{\sum_i^n V_i}}, \quad (13)$$

де  $V_i$  – об'єм кормових компонентів, що входять до складу суміші;  $K_{vp}$  – показник узгодження маси в об'ємі, с/кг;  $\gamma$  – щільність суміші, кг/м<sup>3</sup>.

Змішування кормових компонентів, які завантажуються в бункер, відбувається інтенсивніше при наближенні об'ємів  $V_1 \cong V_2$ .

У третьому розділі «Дослідження мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату» приведено класифікацію комбінованих кормоприготувальних агрегатів, розроблено методику комплексної оцінки ефективності процесу приготування кормових сумішок мобільними комбінованими кормоприготувальними агрегатами, обґрунтовано форму бункера, встановлення ножів, параметри шнека та форму ножів, досліджено рух кормової суміші в середині бункера та динамічні навантаження в елементах конструкції мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату.

Змішування кормових компонентів відбувається за допомогою шнека, який забезпечує обертовий рух корму, а також у вертикальному та горизонтальному напрямках. Ефективність змішування забезпечується наявністю надгвинтового простору. Для визначення об'єму надгвинтового простору у бункері мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату розглянуто й проаналізовано повільну течію в'язкопластичної кормової суміші (модель Шведова-Бенгама з удаваною динамічною в'язкістю) впродовж осі бункера, радіус  $r$  якого змінюється за законом:

$$r = r_0 + \delta \cdot \sin(a_n z), \quad (14)$$

де  $z$  – координата вздовж осі бункера;  $a_n$  – постійний параметр  $a_n = \frac{2\pi}{\lambda_3}$ ;  $\lambda_3$  – довжина згинної хвилі, м;  $\delta$  – найбільше відхилення радіусу бункера від середнього значення ( $r_0$ );  $r_0$  – середнє значення радіуса бункера, м;  $r$  – максимальне значення радіуса бункера у поздовжній площині, м.

Вібрація, присутня при течії суміші справляє на неї вплив у двох напрямках (поперечному до осі й вздовж цієї осі). Для аналізу цієї течії (за наявної вібрації) використано підхід наближений до методу запропонованого академіком А. Ю. Ішлінським. Компоненти швидкості  $U_r$ ,  $U_z$  руху кормової суміші, в бункері змінного перерізу, викликана впливом вібрацій, перпендикулярних поздовжній осі бункера, виражається співвідношенням:

$$U_r = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \chi}{\partial z}, \quad U_z = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \chi}{\partial r}, \quad (15)$$

де  $\chi(r, z)$  – функція, котра є розв'язком диференційного рівняння у частинних похідних

$$\frac{\partial^4 \chi}{\partial r^4} - \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial^3 \chi}{\partial r^3} + \frac{3}{r^2} \frac{\partial^2 \chi}{\partial r^2} - \frac{3}{r^3} \cdot \frac{\partial \chi}{\partial r} + 2 \cdot \left( \frac{\partial^4 \chi}{\partial r^2 \partial z^2} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^3 \chi}{\partial z^2 \partial r} \right) + \frac{\partial^4 \chi}{\partial z^4} = 0. \quad (16)$$

Течія кормової суміші має дві складові (основну та викликану вібрацією збурену складову), а також умови: 1) «прилипання» на стінках бункера; 2) обмеженість швидкості руху на осі бункера, можна отримати для компонент (залежать від безрозмірних параметрів) швидкості руху кормової суміші граничні умови виду

$$\begin{cases} \frac{a_n}{r_0} - \frac{2 \cdot U \cdot \delta}{r_0} \cdot [\bar{A} \cdot \bar{U}' + \bar{C} \cdot (2\bar{U}' + \bar{x}\bar{U})] = 0, \\ \bar{A} \cdot \bar{U} + \bar{C} \cdot \bar{x} \cdot \bar{U}' = 0, \quad \bar{x} = a_n r_0, \quad \bar{U}(\bar{x}) = \bar{U}(a_n r_0), \quad \bar{U}'(\bar{x}) = \bar{U}'(a_n r_0) \end{cases} \quad (17)$$

де  $U$  – максимальна швидкість течії кормової суміші на осі шнека бункера, м/с;  $\bar{U}'$  – безрозмірна інтегральна величина;  $\bar{U}$  – безрозмірна величина.

$$\bar{A}, \bar{C} \text{ визначаються з } \bar{A} = \frac{2\bar{x} \cdot \bar{U}' \cdot U \cdot \delta}{a_n \cdot (2\bar{U} \cdot \bar{U}' + \bar{x} \cdot \bar{U}^2 - \bar{x} \cdot (\bar{U}')^2)}; \quad \bar{C} = \frac{2\bar{U}' \cdot U \cdot \delta}{a_n \cdot (2\bar{U} \cdot \bar{U}' + \bar{x} \cdot \bar{U}^2 - \bar{x} \cdot (\bar{U}')^2)}.$$

Функції  $U_z$  та  $U_r$  можна знайти зі співвідношень

$$U_z = U_z^0 + \frac{a_n}{r} \cdot \{\bar{A} \cdot U'(x) + \bar{C} \cdot [x \cdot U''(x) + U'(x)]\} \cdot \sin(a_n z), \quad (18)$$

де

$$U_z^0 = U \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right), \quad x = ar, \quad U = -ixI_1(ix). \quad (19)$$

а,  $U'' = \frac{U'}{x} + U$ , привівши вираз до виду:

$$U_z = U \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right) + \frac{a_n}{r} \cdot [\bar{A} \cdot U' + \bar{C} \cdot (2U' + x \cdot U)] \cdot \sin(a_n z). \quad (20)$$

Для компоненти  $U_r$  швидкості маємо:

$$U_r = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \chi}{\partial z} = -\frac{a_n}{r} \cdot \varphi(a_n r) \cdot \cos(az) = -\frac{a_n}{r} \cdot (\bar{A} \cdot U + \bar{C} \cdot x \cdot U') \cdot \cos(a_n z). \quad (21)$$

Висоту надгвинтового простору знаходимо зі співвідношення

$$\int_0^x \frac{U^2}{x} dx = -\int_0^x x \cdot I_1^2(ix) dx = -\frac{x^2}{2} \cdot [I_1^2(ix) - I_0(ix) \cdot I_2(ix)] \quad (22)$$

де враховано

$$U'(x) = \frac{d}{dx} [-ix \cdot I_1(ix)] = -i \cdot I_1(ix) + x \cdot I_1'(ix) = x \cdot I_0(ix), \quad (23)$$

Наявність складових  $U_z$  і  $U_r$ , одна з яких залежить від параметрів вібрацій шнека, (амплітуди і частоти) сприяє інтенсифікації переміщення кормової суміші та компонентів в самій суміші, як в поздовжньому, так і в поперечному напрямку до осі бункера. За результатами числового вирішення рівнянь (14)–(23) висота  $H_{\text{сум}}$  кормової суміші над шнеком становить 0,4–0,6 м.

Бункер мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату складається із двох основ: нижня має форму круга, а верхня утворюється із двох радіусів з центрами, віддаленими від осьової нижньої основи на величину  $L/2$ , і набуває форми еліпса (рис. 4, б). В середині бункера в процесі роботи мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату утворюються чотири основних зони: дві подрібнення та дві змішування (рис. 4, а). Величина  $L$  – це сторона рівнобедреного трикутника, відстань між боковими стінками рівна діаметру нижньої основи бункера. Об'єм бункера становить:

$$V_{\bar{o}} = ((\pi R^2 H + LHR) - V_{\text{шн}}) \beta_{\text{бунк}} \quad \text{або} \quad V_{\bar{o}} = 1,15 \dots 1,25 (\pi R^2 H + LHR). \quad (24)$$

де  $R$  – радіус нижньої основи бункера, м;  $H$  – висота бункера, м;  $V_{\text{шн}}$  – об'єм шнека, м<sup>3</sup>;  $\beta_{\text{бунк}}$  – коефіцієнт заповнення бункера,  $\beta_{\text{бунк}} = 0,9 - 0,98$ .

При створенні типорозмірного ряду мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату потрібно визначити, які параметри в формулі (24) є технологічними, а які будуть залежати від умов експлуатації.

Величина  $L$  та кут  $\alpha_c$  (кут нахилу стінки відносно вертикальної осі МККПА) є розрахунковими, а висота бункера  $H$  буде залежати від параметрів допоміжних машин, обслуговуваних приміщень та міркувань безпечної експлуатації мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату.

Кормові компоненти, які завантажують в бункер мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату мають різні фізико-механічні властивості. Згідно зоотехнічних вимог, кормова суміш повинна мати високу рівномірність змішування, а розміри часток грубих кормів повинні наближатись до величини 40–60 мм. При сталому русі кормових компонентів

всередині бункера мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату (рис. 4, в) активно проходять процеси подрібнення та змішування кормових компонентів. При цьому, процес подрібнення забезпечується при переході з розширеної зони бункера до звуженої, для змішування потрібно збільшення простору, а також забезпечення роботи мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату без застійних зон. На (рис. 4, в) наведено схему сил, які діють на стінку бункера. Це сили: тяжіння –  $g \cdot dm$ , тертя по стінці бункера –  $F = N \cdot f_1 = g \cdot dm \cdot f_1$ , відцентрова –  $F_{\text{ц}} = \omega^2 \cdot \tilde{r} \cdot dm$ , внутрішнього тертя кормової суміші –  $P_{\text{в}} = g \cdot dm \cdot f_2$ ,  $N$  – нормальна реакція стінки бункера;  $dm$  – маса кормової суміші, кг;  $g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;  $f_1$  – коефіцієнт тертя суміші по стінці бункера;  $f_2$  – коефіцієнт внутрішнього тертя суміші. Сила внутрішнього тертя  $P_{\text{в}}$  виникає внаслідок переміщення складових кормової суміші між собою при підніманні шнеком однієї частини та зсуву по стінці іншої напрям її співпадає із віссю шнека. Відцентрова сила виникає внаслідок дії шнека направлена під кутом, який визначається, виходячи із конструкції машини, тобто по відношенню до осі обертання шнека 90° в усі сторони та проектується на похилу стінку бункера на кут  $\alpha_c$  по відношенню до нормальної реакції стінки бункера. Для визначення кута нахилу стінки  $\alpha_c$  складемо систему рівнянь

$$\begin{aligned} \sum F_x &= F_{\text{ц}} \cos \alpha_c + dm g \sin \alpha_c - N - P_{\text{в}} \sin \alpha_c, \\ \sum F_y &= P_{\text{в}} \cos \alpha_c + F - dm g \cos \alpha_c + F_{\text{ц}} \sin \alpha_c. \end{aligned} \quad (25)$$

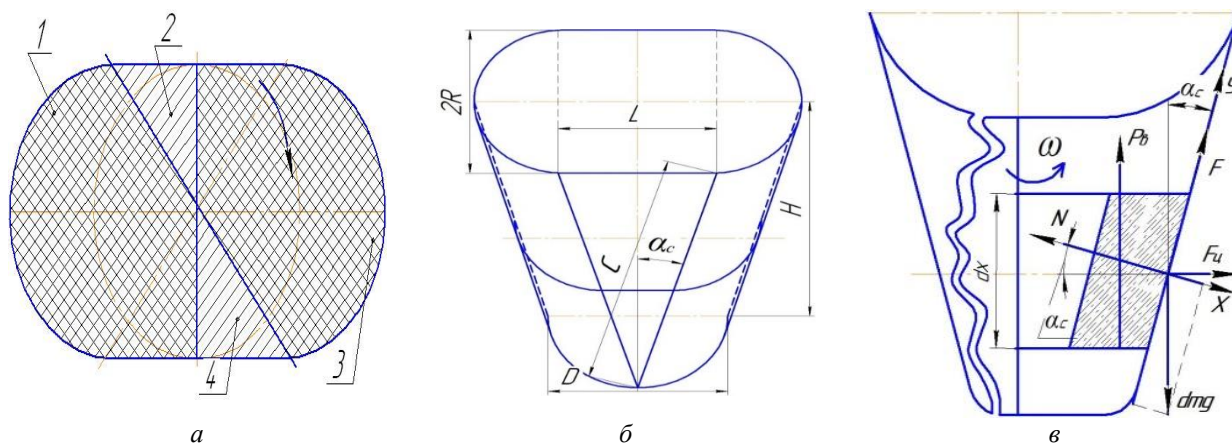


Рис. 4. Бункер мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату: а – зони бункера мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату; б – для визначення розмірів бункера; в – схема дії сил на шар корму, який розміщений на стінці бункера; 1, 3 – зони змішування; 2, 4 – зони подрібнення

$\sum F_x = F_{\text{ц}} \cos \alpha_c + dm g \sin \alpha_c - N - P_{\text{в}} \sin \alpha_c, \sum F_y = P_{\text{в}} \cos \alpha_c + F - dm g \cos \alpha_c + F_{\text{ц}} \sin \alpha_c$  Величини  $L$  та кут  $\alpha_c$  нахилу стінки бункера становлять:

$$L = \sqrt{c^2 - H^2} \quad \text{та} \quad \alpha_c = \arctg \frac{g(1-f_2) - f_1 \omega^2 \cdot \tilde{r}}{\omega^2 \cdot \tilde{r} + g f_1 - g f_1 f_2}, \quad (26)$$

де  $c$  – бічна поверхня бункера, м.

В процесі приготування кормової суміші важливим є унеможливлення утворення застійних зон на поверхні похилих стінок та забезпечення заповнення міжспірального простору, який утворюється внаслідок забору кормового матеріалу витком шнека. Шлях та швидкість переміщення матеріалу для заповнення шнека при його обертанні за умови  $\alpha > \varphi$  обумовлюється нерозривністю потоку. Заповнення міжспірального простору кормовою сумішшю відбувається при сталому рівномірному русові, що змінюється по висоті бункера. Заповнення міжспірального простору кормовою сумішшю відбувається при сталому нерівномірному русові, що плавно змінюється, по висоті бункера. Траєкторію руху потоку розглядаємо в двох перерізах, що перебувають на малій відстані  $dS$  один від одного (рис. 5):

$$\frac{dh_2}{dS} + \frac{1}{\rho_2 g} \cdot \frac{d(P_a + \rho_2 h_2 g)}{dS} + \frac{d}{dS} \left( \frac{V^2}{2g} \right) + \frac{1}{\rho_2 g} \cdot \frac{d((P_a + \rho_c h_c g) \cdot (f_1 + f_2))}{dS} = 0, \quad (27)$$

де  $h_2$  – геометричний напір (виражає потенційну енергію положення кормової суміші), м;  $P_a$  – тиск над кормовою сумішшю, Па;  $h_c$  – відстань розміщення центра тяжіння площадки  $dS$ , м;  $\rho_c$  – щільність кормової суміші в центрі тяжіння площадки  $dS$ , м.

В процесі приготування кормової суміші відбувається постійне переміщення складових кормового раціону всередині бункера, який має змінну форму поперечного перерізу.

Рухаючись по похилій стінці в напрямку до днища бункера, кормові компоненти ущільнюються внаслідок чого забезпечується безперервність потоку кормової суміші.

$$S_{n1} \cdot \rho_1 = S_{n2} \cdot \rho_2. \quad (28)$$

де  $S_{n1}, S_{n2}$  – площа поперечного перерізу потоку, м<sup>2</sup>.

З рівняння (28) визначимо об'ємну масу кормової суміші біля основи шнека

$$\rho_2 = \frac{S_{n1} \cdot \rho_1}{S_{n2}}.$$

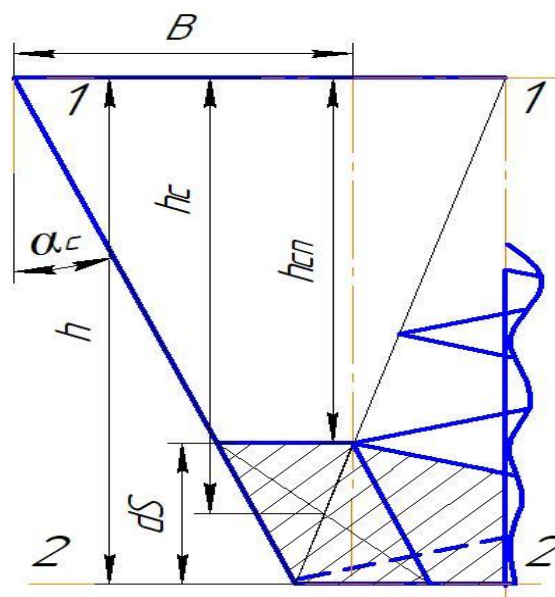


Рис. 5. До визначення параметрів заповнення шнека сумішшю

З рівняння (23) швидкість руху кормової суміші на проміжку заповнення міжспірального простору шнека становить

$$V_2 = \sqrt{-2gh_2 - \frac{2}{\rho_2}(P_a + \rho_2 h_2 g) - \frac{2}{\rho_2}(P_a + \rho_c h_c g) \cdot (f_1 + f_2)}. \quad (29)$$

Пройдений кормовою сумішшю шлях при заповненні простору між спіралями шнека складе

$$S = \frac{1 - \frac{Q^2}{g} \frac{B}{S_{пл2}^3}}{i - \frac{Q^2}{K^2}} h_2, \quad (30)$$

де  $Q$  – пропускна здатність поперечного перерізу потоку  $S_{n1}$ ,  $S_{n2}$ , м<sup>3</sup>/с;  $B$  – відстань між стінками потоку кормової суміші при глибині  $h$ , м;  $i$  – геометричний нахил стінки бункера, рад;  $K$  – витратні характеристики поперечного перерізу потоку, м<sup>3</sup>/с.

В мобільних комбінованих кормоприготувальних агрегатів, як з горизонтальним, так і з вертикальним розміщенням шнеків, умовою встановлення ножів на витках шнека є забезпечення подрібнення або доподрібнення кормових компонентів у процесі приготування кормової суміші.

Збільшення кута  $\alpha_n$  до величини кута підняття гвинтової лінії шнека приводить до зростання сили тертя корму по поверхні ножа (рис. 6).

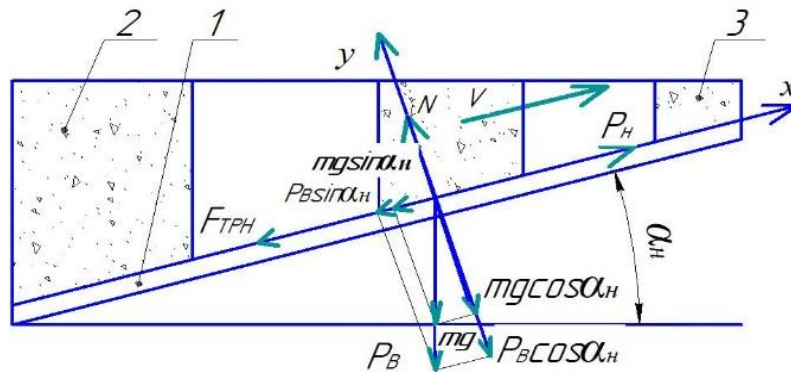


Рис. 6. До визначення сил, які діють на рух корму по поверхні ножа: 1 – ніж; 2 – початкова щільність корму; 3 – кінцева щільність корму

Ножі, встановлені на гвинтовій поверхні шнеку, спричиняють додаткове тертя, при переміщенні кормом поверхнею ножа. Величина  $f_1 mg$  зростає від початку до кінця ножа (рис. 6). Сили тертя зумовлюють до поступового ущільнення корму на поверхні ножа, а, отже, до збільшення об'ємної маси корму та збільшення енергетичних витрат. Зростання зусиль при переміщенні матеріалу поверхнею ножів (за умови  $\alpha_n > 0$ ), спричиняє активніше зношування їх поверхонь.

На кормовий матеріал (рис. 6 та 7), який знаходиться на поверхні ножа, діють сили тяжіння –  $mg$ ; тертя –  $f_1 N$ ; нормальна реакція площини –  $N$ ; сила, яка забезпечує переміщення матеріалу –  $P_n$ ; сила, що описує взаємодію кормових компонентів між собою –  $P_B$ .

Згідно діючих сил спроектованих на вісь  $X$ , та  $Y$

$$\begin{cases} P_n - mg \sin \alpha_n - F_{ТPH} - P_B \sin \alpha_n = 0; \\ N - mg \cos \alpha_n - P_B \cos \alpha_n = 0, \end{cases} \quad (32)$$

сила  $P_H$ , переміщення матеріалу поверхнею ножа становить:

$$P_H = mg(\sin \alpha_H + f_1 \cos \alpha_H + f_1 \cdot \frac{S_H \cdot h_{CH}}{V_6} \cdot f_2 \cdot \cos \alpha_H + f_1 \cdot \frac{S_H \cdot h_{CH}}{V_6} \cdot f_2 \cdot \sin \alpha_H) \quad (33)$$

Аналіз рівняння свідчить про те, що при куті встановлення ножа  $\alpha_H > 0$ , збільшується сила  $P_H$  на переміщення кормової суміші.

Якщо  $\alpha_H = 0$ , сила  $P_H$  буде мати мінімальне значення  $P_H = f_1 \cdot mg$ .

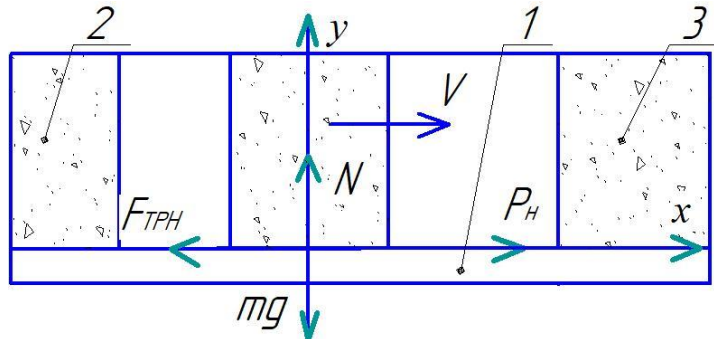


Рис. 7. До обґрунтування кута встановлення ножа: 1 – ніж; 2 – початкова щільність корму; 3 – кінцева щільність корму

Виявлено, що в процесі приготування кормової суміші, до складу якої входять довгостеблові матеріали, енергоємність виконання процесів зростає, а інтенсивність подрібнення знижується. Це можна пояснити особливостями процесу різання в таких апаратах, де протирізальними елементами виступають ущільнені нижні та пристінні шари кормів. За таких умов різання відбувається тільки тоді, коли сили тертя в них більше сил, необхідних на руйнування матеріалу. Кількість ножів, закріплених на шнеку, визначали експериментально, виходячи із умов забезпечення циркуляції матеріалу в бункері. Збільшення числа ножів веде до часткового зависання довгостеблових кормів на верхніх витках шнека, особливо це проявляється при роботі з рулонами і паками. Ножі, розташовані на верхньому витку, руйнують в основному великі сформовані частини рулонів і паків, шляхом їх розривання на більш дрібні частини, які потім потрапляють вниз в зону активного різання. Подрібнення у верхніх зонах відбувається переважно за рахунок руйнування крихких складових кормового матеріалу.

Процес подрібнення (доподрібнення) кормових компонентів до зоотехнічно-нормованих розмірів протікає в зоні дії ножів, розташованих на нижніх витках шнека, а також за допомогою дії висувних протирізів, які гальмують кормові компоненти.

Сприятливі умови для різання верхніми ножами, які розміщені на шнеку, виникають в місцях, де радіус бункера є мінімальним, внаслідок дії сил тертя матеріалу по стінках бункера та внутрішнього тертя кормових матеріалів.

При руйнуванні кормових монолітів (рулонів, паків) та при різанні довгостеблових матеріалів використання (гладких) ножів спеціальної форми приводить до інтенсивного різання за рахунок ефекту ковзного різання.

Раціональна форма ножа та його розміщення на шнеку створюють умови защемлення матеріалу по всій довжині леза ножа, рівномірне навантаження на приводному валу машини та мінімальну енергоємність процесу подрібнення.

За дотримання умови защемлення ( $\chi \leq 2\varphi$ ) перероблюваного матеріалу між ножом і умовною протирізальною пластиною, максимальних значень кута ковзання і ефективності ковзного різання можна досягти лише вибором раціонального розміщення центра обертання, відносно умовної протирізальної пластини при зміщенні крайньої горизонтальної точки, відносно осі обертання ( $h=0$ ) та форми леза ножа.

В процесі приготування кормової суміші було виявлено, що багатофункціональні кормоприготувальні агрегати з вертикально розміщеним конічним шнеком у бункері, мають більшу споживану потужність (більше 35 кВт). Споживана потужність на привід робочих органів прямо пропорційна частоті обертання шнека. Виходячи з цього, доцільно забезпечувати частоту обертання шнека в межах  $16\text{--}20 \text{ хв}^{-1}$  при подрібненні рулонів та паків, а в режимі змішування та роздавання –  $24\text{--}25 \text{ хв}^{-1}$ .

Самоочищення витків шнека (рис. 8) при низькій частоті їх обертання може бути забезпечене у випадку, якщо твірна витка розташована не перпендикулярно, а похило до осі шнека.



Рис. 8. Шнек після видачі кормової суміші

Обґрунтування складної форми шнека вимагає принципово нових підходів до визначення його параметрів. Діаметр шнека визначається, виходячи із умови ефективності процесу приготування кормової суміші та забезпечення зоотехнічних вимог, які ставляться до кормоприготувальних машини, насамперед, унеможливлення застійних зон.

Відповідно, діаметр нижньої основи шнека повинен дорівнювати величині нижньої основи конуса, за виключенням технологічного зазору,  $D_{ш} = 2R - 2\Delta l$ . Стосовно верхньої основи – її параметри визначають, виходячи із продуктивності шнека, з урахуванням раніше визначених параметрів бункера.

Частоту обертання ротора визначали з умов руху кормових компонентів по його поверхні. На корм по всій поверхні шнека діють: сила тяжіння  $mg$ , відцентрова сила інерції  $mR\omega^2$ , нормальна реакція шнека  $N_{ш}$ , сила тертя по гвинтовій навивці  $fmg$ , сила Кориоліса  $2m\omega v$  та тертя від неї  $2fm\omega v$ :

$$mR\omega^2 > fmg + 2fm\omega v. \quad (34)$$

Переміщення кормових компонентів від осі до краю витка шнека можливе, якщо сила інерції більша за силу тертя, що виникає внаслідок дії сили земного тяжіння.

Очищення витків шнека від кормової суміші досягається за таких умов:

$$\begin{cases} F_{ky} = N + F_u \sin \beta \sin \alpha - F_{zm} \cos \beta \cos \alpha + F_k \sin \beta \sin \alpha - F_{km} \sin \beta \sin \alpha; \\ F_{kx} = F_u \cos \beta \cos \alpha + F_{zm} \sin \beta \sin \alpha - F_{mp} + F_k \cos \beta \cos \alpha - F_{km} \cos \beta \cos \alpha. \end{cases} \quad (35)$$

Звідси, кут нахилу твірної шнека до горизонту (рис. 9) становить:

$$\beta = \arctg \frac{2\pi R(fg - \omega^2 R - 2\omega v + 2f\omega v)}{S_{ш}(f\omega^2 R + 2f\omega v - 2f^2\omega v + g)}. \quad (36)$$

де  $S_{ш}$  – крок гвинтової лінії шнека, м.

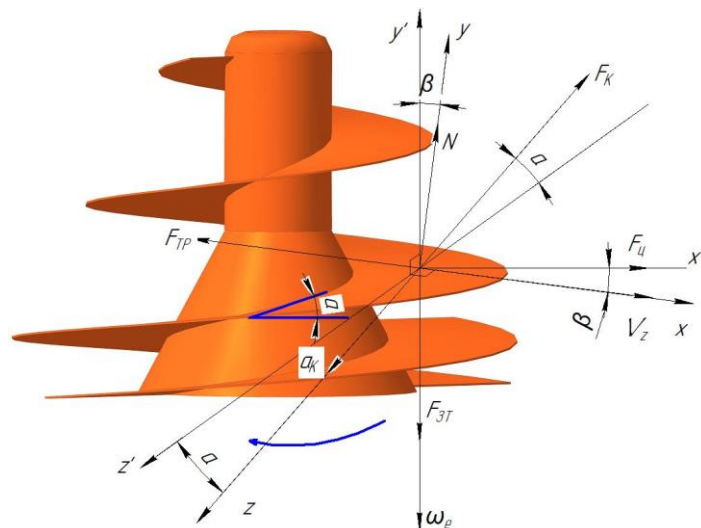


Рис. 9. До визначення кута нахилу твірної шнека

Самоочищення витків, при перпендикулярному розміщенні їх до осі шнека, згідно теоретичних досліджень забезпечується при частоті обертання не менше  $25 \text{ хв}^{-1}$ . Зрівноваження динамічних навантажень в елементах конструкції мобільного кормозмішувача забезпечує підвищення ефективності роботи останнього. Для визначення динамічних навантажень, в елементах конструкції мобільного кормозмішувача, побудовано тримасову динамічну модель з чотирма ступенями вільності (рис. 10).

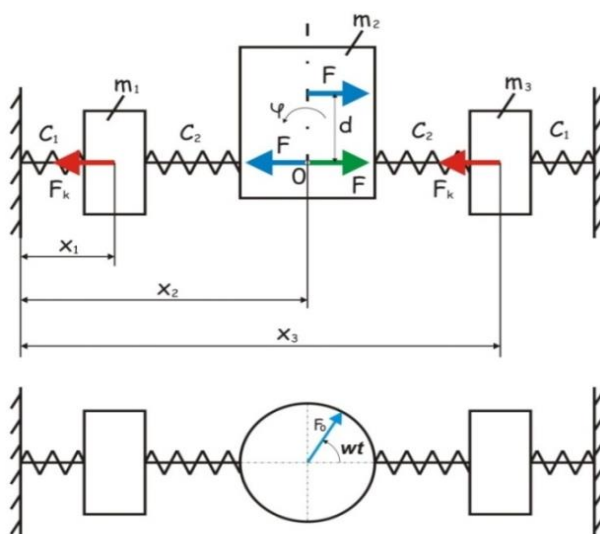


Рис. 10. Динамічна модель мобільного комбінованого кормо-приготувального агрегату

В моделі прийняті такі позначення:  $\varphi$  – кутова координата повороту змішувача;  $C_1$  – поперечна жорсткість шин, які взаємодіють з поверхнею дороги;  $C_2$  – жорсткість підвіски в поперечному напрямку;  $m_1=m_3$  – маси коліс;  $m_2$  – маса змішувача;  $F_o$  – відцентрова сила від неврівноваженої маси кормової суміші, що змішується;  $F$  – проекція відцентрової сили від неврівноваженої маси вантажу на поперечну вісь;  $F_k$  – сила тертя між колесом і поверхнею дороги;  $x_1, x_2, x_3$  – лінійні координати центрів мас коліс з підвісками та змішувача в поперечному напрямку, які разом з кутовою координатою  $\varphi$  приймають за узагальнені координати;  $d$  – відстань до центра мас змішувача, від осі коліс, у вертикальному напрямку.

Для побудови математичної моделі динаміки руху мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату використано рівняння Лагранжа II роду:

Кінетична енергія системи  $T$  має вигляд:

$$T = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{x}_3^2, \quad (38)$$

де  $I_2$  – момент інерції ротора змішувача та суміші, що знаходиться в ньому, відносно осі обертання;  $x_1, x_2, x_3$  – поперечні лінійні координати центрів мас відповідно шин та шнека.

Диференціальні рівняння руху змішувача:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = -\left(m_1 + \frac{m_2}{2}\right) g \cdot f \cdot (C_1 + C_2)x_1 + C_2(x_2 + d \sin \omega t); \\ m_2 \ddot{x}_2 = m \omega^2 R \cos \omega t - C_2(2x_2 - x_1 - x_3); \\ m_3 \ddot{x}_3 = -\left(m_1 + \frac{m_2}{2}\right) g \cdot f \cdot (C_1 + C_2)x_3 + C_2(x_2 + d \sin \omega t); \\ I_2 \ddot{\varphi} = -m \omega^2 R d \cos \omega t - C_k \varphi. \end{cases} \quad (39)$$

Для розв'язку використано чисельний метод, який реалізовано за допомогою комп'ютерної програми Mathematica.

Закони зміни лінійного переміщення шин ( $x_1, x_3$ ), центра мас змішувача ( $x_2$ ), а також закон зміни кутової координати вертикальних відхилень змішувача наведено на (рис. 11). Коливальний процес, який виникає зі зміною лінійних переміщень, швидкостей і прискорень центрів мас елементів змішувача, може призвести до втрати рівноваги мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату.

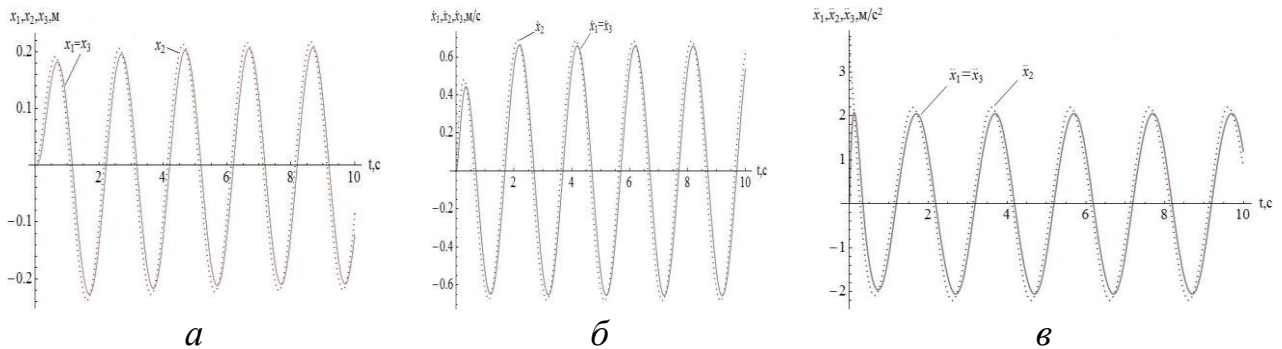


Рис. 11. Графіки зміни лінійних переміщень (а), швидкостей (б), прискорень (в) шин в поперечному напрямку

Закон зміни лінійного переміщення обох шин в поперечному напрямку ( $x_1$ ,  $x_3$ ) однаковий, тому криві накладаються одна на одну. Максимальне переміщення складає 0,18 м. Сам бункер змішувача, а саме його центр мас ( $x_2$ ), відхиляється на 0,19 м (рис. 11, а). Розмах зміни лінійних швидкостей центрів мас коліс і змішувача в поперечному напрямку, знаходиться в межах 1,2 м/с (рис. 11, б). Графіки зміни прискорень центрів мас коліс і змішувача теж мають коливальний характер. Значення прискорень коливається в межах від  $-2$  м/с<sup>2</sup> до 2 м/с<sup>2</sup> (рис. 11, в).

Шнек-змішувача від дії незрівноваженої маси суміші під час роботи мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату здійснює гармонійні коливання (рис. 12).

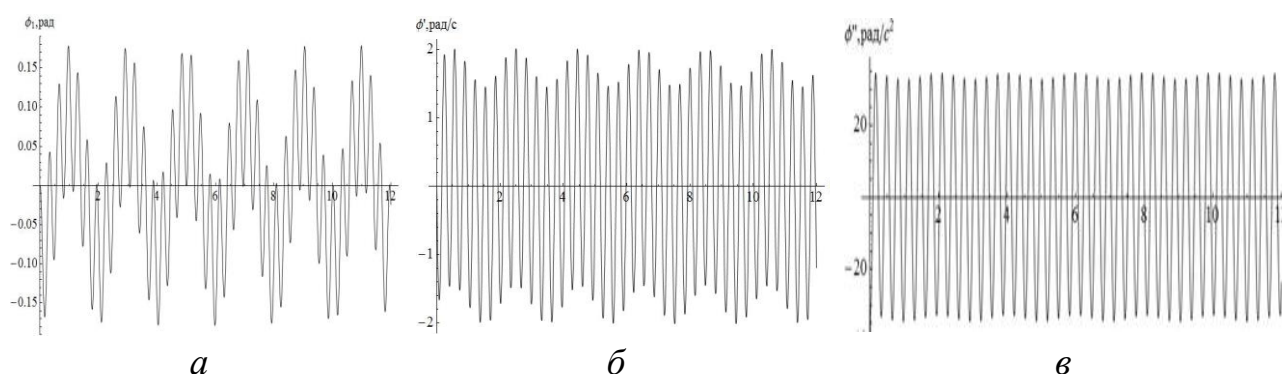


Рис. 12. Графіки зміни кутових переміщень (а), швидкостей (б), прискорень (в) шнека від незрівноваженої маси суміші в середині бункера

З (рис. 12, а), видно, що максимальний кут відхилення бункеру від незрівноваженої маси суміші під час роботи мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату складає 0,17 рад, а швидкість згинних коливань не перевищує  $\pm 2$  рад/с (рис. 12, б). Графік зміни кутового прискорення на початку має ривок, потім виходить на усталений рух з постійним характером зміни коливань в межах  $\pm 30$  рад/с<sup>2</sup> (рис. 12, в).

Для забезпечення зрівноваження та довговічності роботи кормоприготувального агрегату, а також рівномірності видачі кормової суміші вздовж фронту годівлі у нижній частині конусоподібного шнека доцільно розташувати симетрично одна одній дві гвинтові навивки. Це забезпечує рівномірність навантаження від дії кормової суміші на вісь шнека, незалежно від кута повороту останнього, при цьому одна із навивок має обмеження у довжині.

У четвертому розділі «Програма і методика експериментальних досліджень агрегату» наведено програму і методику експериментальних досліджень процесів приготування і роздавання кормів. Для перевірки теоретичних передумов, а також визначення раціональних параметрів агрегату, програма експериментальних досліджень передбачала:

– визначення фізико-механічних характеристик кормових компонентів і сумішей для великої рогатої худоби;

– встановлення енергетичних затрат при застосуванні машинних технологій в процесі забезпечення годівлі тварин, а також закономірності їх зміни залежно від режимів роботи мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату;

– вивчення впливу кінематичних параметрів і конструктивних особливостей робочих органів на якісні показники кормової суміші та оцінка їх відповідності встановленим зоотехнічним вимогам;

– обґрунтування раціональних параметрів мобільного кормоприготувального агрегату, при яких забезпечується якісне подрібнення і змішування кормових компонентів.

Стосовно фізико-механічних характеристик визначали вологість та об'ємну масу складових кормових компонентів подрібнених грубих, концентрованих, соковитих кормах (сінаж, силос, сіно, солома, кормовий буряк), контрольного компонента (насіння сої) та кормової суміші з цих кормів. Вказані характеристики необхідні для аналізу теоретичних залежностей.

Існуючі методи оцінки рівномірності змішування за контрольним компонентом, відзначаються складністю виділення останнього. Відомо, що вологість кормової суміші знаходиться в функціональній залежності від вологості  $W_k$  кормових компонентів. В зв'язку з цим, було обґрунтовано і апробовано методику оцінки рівномірності змішування кормової суміші за перерозподіленням вологи, в процесі перемішування кормових компонентів. Відповідно до заданого складу кормового раціону, перед приготуванням кормової суміші визначали вологість кожного вихідного компоненту до завантаження їх в бункер змішувача. Потім розраховували очікувану (теоретичну) вологість суміші  $W_{c.t}$  як середньозважений показник. В процесі приготування кормової суміші відбирали проби і визначали її фактичну вологість  $W_{\phi}$ . Порівнянням фактичної та теоретичної вологості оцінювали рівномірність перемішування кормових компонентів.

Запропонований алгоритм встановлює закономірні зв'язки між природною вологістю  $W$  кормових компонентів та технічними параметрами змішувача:

$$W = f\{\sum_{i=1}^{n_1} \Gamma_i, \sum_{i=1}^{n_2} D_i\}, \quad (40)$$

де  $\Gamma_i$  – фізико-механічні властивості кормових компонентів;  $D_i$  – технічні параметри змішувача,  $n_1 \neq n_2$ .

Для реалізації програми експериментальних досліджень було розроблено і виготовлено експериментальний мобільний комбінований кормоприготувальний агрегат (рис. 13, а), робочим органом якого є вертикальний конічний шнек 1, по периферії витків розташовані ножі. Шнек консольно закріплений в бункері 2, що представляє собою перевернутий усічений конус, основу якого виконано у вигляді кола, верхня ж частина, з метою кращого змішування та збільшення місткості бункера, виконана овальної форми. Допоміжним робочим органом агрегату є транспортер, що дозволяє видавати кормову масу за межі габаритів агрегату.

Кінематичні режими шнека регулювалися двигуном трактора та редуктором (рис. 13, б). При проведенні експериментів, маса завантажених компонентів контролювалася за допомогою фермських ваг та вагового механізму, який розміщено на платформі змішувача-роздавача.

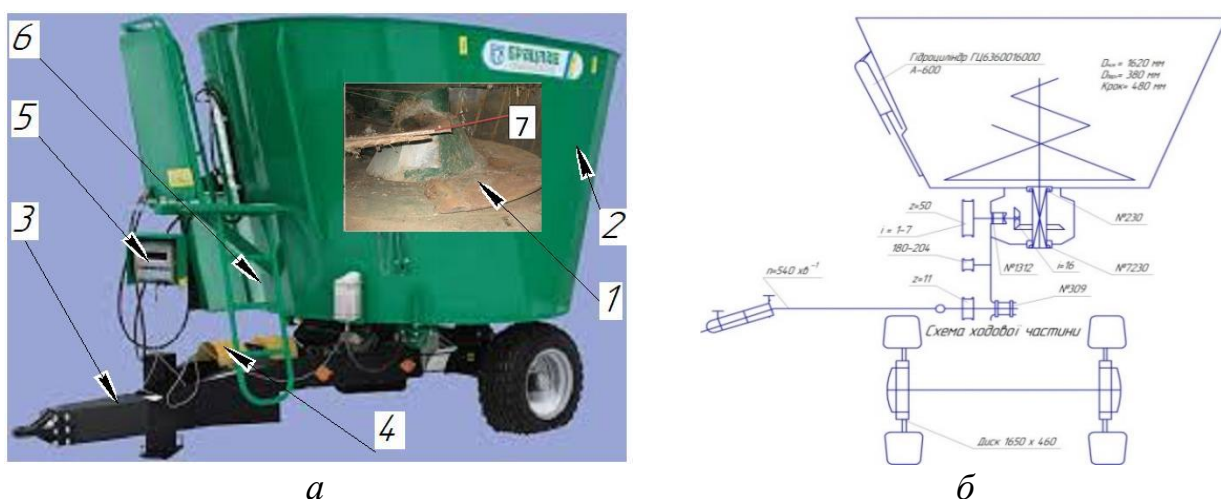


Рис. 13. Загальний вигляд (а) та кінематична схема експериментального мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату (б): 1 – змішувально-подрібнювальний шнек; 2 – бункер; 3 – ходова частина; 4 – карданний вал; 5 – пульт тензометричного зважування; 6 – вивантажувальне вікно; 7 – додаткова гвинтова навивка

Вологість кормових компонентів, які застосовувалися для приготування збалансованої кормової суміші для рогатої худоби, відповідала значенням вологості, згідно із зоотехнічними вимогами. Найбільшу вологість (81 %) мали буряк і силос (72,2 %), а грубі і концентровані корми – на рівні 14,5 і 10,3 % відповідно.

Фракційний склад вихідної кормової сировини після подрібнення відповідав зоотехнічним вимогам для приготування повноцінних кормових сумішок рогатій худобі.

Для зважування окремих порцій кормів, при визначенні щільності кормової маси, втрат і рівномірності роздавання використовували товарні ваги РП-100Ш13 та електронні з платформою фірми Dahongying, а при визначенні фракційного складу, якості змішування – ваги ВЛКТ-500. Частоту обертання конічного шнека та валу відбору потужності заміряли за допомогою оптичного безконтактного цифрового тахометра DT2234C+. Час подрібнення і змішування компонентів контролювали секундоміром.

Потужність контролювали за витратою палива з допомогою витратоміра DFM-90AP, а також лічильника імпульсів ЦЖУ-25-16 № 2.

Дослідження проводили на молочнотоварній фермі Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Агрономічна дослідна станція» із застосуванням кормів, широко розповсюджених в цій зоні: сіно люцерни та солому у великогабаритних рулонах та паках, пивну дробину, буряк, силос, сінаж, комбікорми.

Обробку отриманих експериментальних даних проводили за допомогою прикладних програм MathCAD, Statistica, Kompas за стандартними методиками математичної статистики. Адекватність відносної похибки перевіряли за критеріями Пірсона та Фішера. Значимість коефіцієнтів регресії та кореляції перевіряли за критерієм Стьюдента. Отримане рівняння перевіряли на адекватність за критерієм Фішера. При обробці результатів експериментів щодо рівномірності роздавання кормової суміші, різницю між значеннями коефіцієнтів варіації на різних режимах оцінювали за допомогою множинного рангового критерію Дункана. Точність експериментів визначали за критерієм Кохрена.

П'ятий розділ «**Результати експериментальних досліджень процесів приготування і роздавання кормів**». При дослідженні процесів подрібнення кормових матеріалів, згідно технології підготовки кормів до згодовування, за умови їх подрібнення, завантаження кормових компонентів проводили в такій послідовності: насамперед, завантажували грубі корми, потім коренебульбоплоди, з метою зберігання соку, який виділяється (рис. 14).

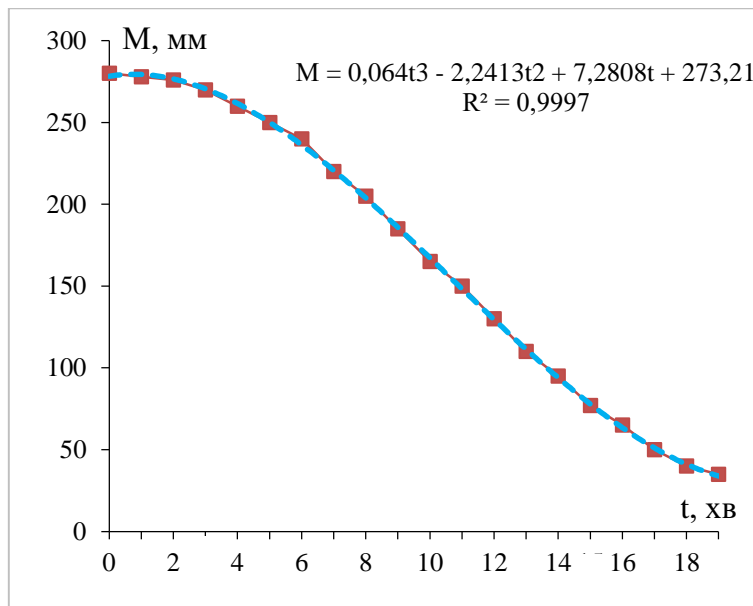


Рис. 14. Графік зміни середнього розміру часток коренеплодів від тривалості подрібнення

Однак, дослідження показали, що грубі корми працюють як амортизатор, пом'якшуючи ударні навантаження на коренебульбоплоди з боку ножів, протиризів і стінок бункера. При першочерговому завантаженні коренебульбоплодів процес подрібнення був більш інтенсивним. Характер зменшення середньозважених розмірів часток коренебульбоплодів від тривалості подрібнення наведено на (див. рис. 14).

Отриману криву (див. рис. 14) можна апроксимувати функцією полінома 3 порядку з достовірністю  $R^2=0,9997$ , при цьому інтенсивність  $I$  процесу складає:

$$I = \frac{dM}{dt} = 0,192 t - 4,4826. \quad (41)$$

Тривалість ефективного процесу подрібнення, тобто час, після якого подальшого подрібнення практично не відбувається, становить  $t=23,35$  хв, а середній розмір часток після подрібнення  $M=36,00$  мм.

Експериментами із довговолокнистими матеріалами та коренеплодами, виявлено, що наявність подрібнених коренебульбоплодів в бункері, при завантаженні грубих кормів, на тривалості подрібнення останніх не позначається. Інтенсивніше процеси подрібнення протікають при роботі на сухому люцерновому сіні (вологість сіна під час експерименту знаходилася в межах 11,2–16,8 %) (рис. 15). Згідно отриманих рівнянь час закінчення процесу на рівні 10,72 хв, при цьому величина часток становить  $M=46,68$  мм.

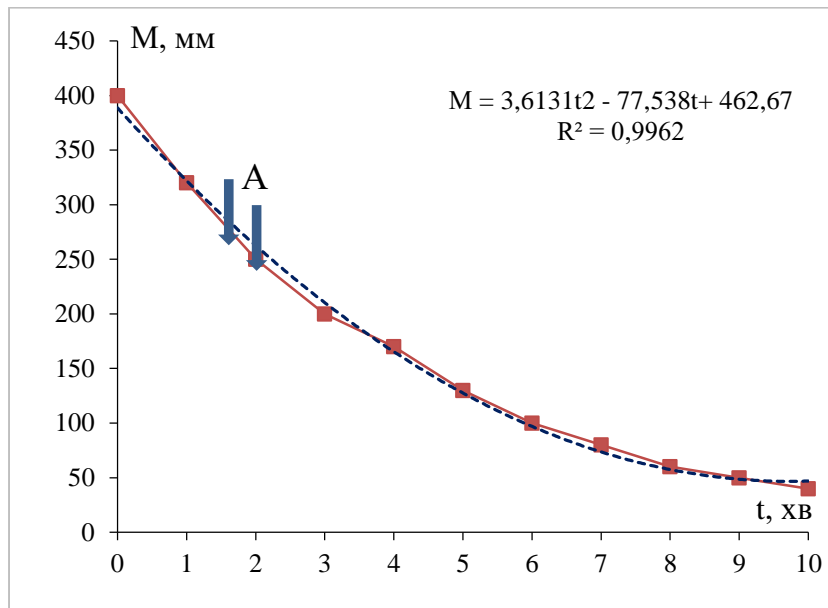


Рис. 15. Графік зміни розміру часток сіна від тривалості подрібнення: А – проміжок руйнування цілісності рулону знаходиться в межах 2,0–2,3 хв

Швидке подрібнення можна пояснити тим, що сухе сіно є крихким матеріалом і тому замість різання переважає процес переламування та перетирання (розщиплення). Подрібнене сіно в такому стані необхідно змішувати з вологими силосованими кормами, коренеплодами, а потім роздавати тваринам.

Графік зміни середньої довжини частинок при подрібненні ячмінної та пшеничної соломи у паках з плином часу представлено на рис. 16.

Низька інтенсивність подрібнення соломи пов'язана з тим, що вона має низьку щільність, і гравітаційних та інерційних сил недостатньо, щоб подати її в зону активного різання, тому переважає ефект розрихлення.

Для обґрунтування технології годівлі тварин, з використанням попередньо подрібнених грубих кормів, було проведено досліди. У бункер змішувача подавали попередньо подрібнені грубі корми, які давали можливість точнішого дозування порівняно з паками чи рулонами. Дослідження було направлено на виявлення якісних показників приготування кормової суміші та зниження часу досягнення мінімально допустимого рівня однорідності змішування.

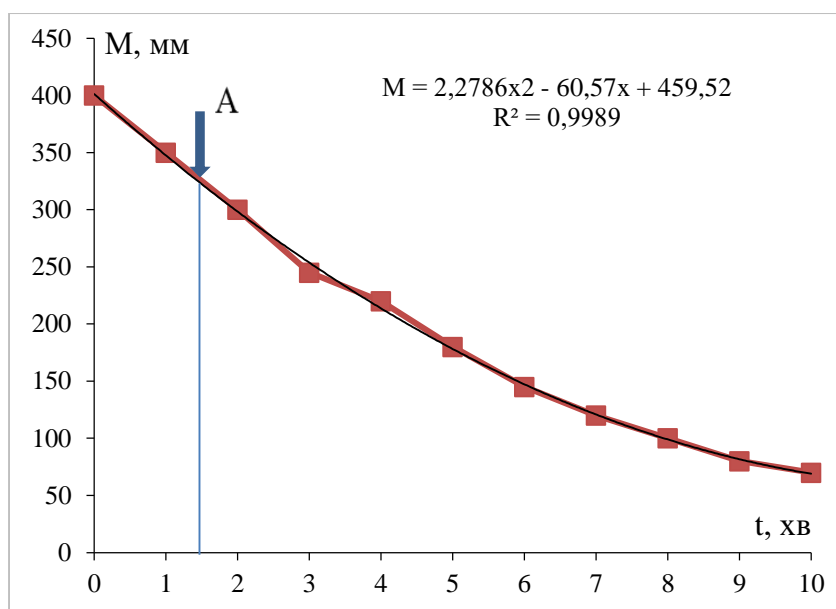


Рис. 16. Графік зміни розміру часток ячмінної соломи від тривалості подрібнення: А – точка руйнування цілості пака

Було здійснено порівняння технології приготування кормової суміші з використанням прес-підбирачів з функцією подрібнення (в рулонах були грубі корми подрібнені до середнього розміру 50 мм) та прес-підбирачів без подрібнення, з довжиною стебел 350–400 мм. При використанні попередньо подрібнених грубих кормів, порівняно з довгостебловими, було виявлено скорочення часу приготування однієї порції кормової суміші на 7–12 хв. При цьому рівномірність змішування досягала 92 % (рис. 17).

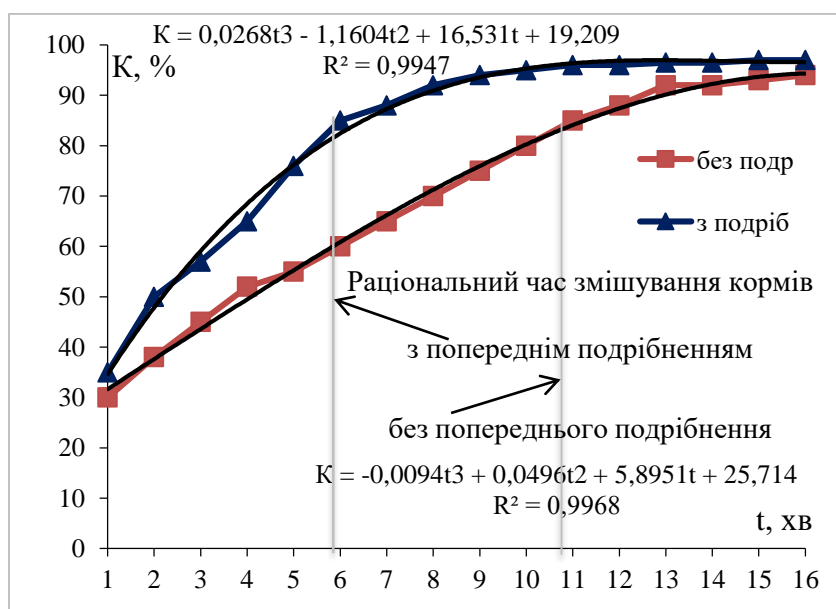


Рис. 17. Рівномірність змішування кормової суміші залежно від часу та стану кормів

Для інтенсифікації процесу подрібнення довговолоконистих матеріалів (солома, сіно) було проведено дослід з додаванням кормів із більшою

об'ємною масою (силосу і жому), які вносилися після руйнування рулону. Так, в одному з дослідів, на 1 рулон соломи масою 236 кг було завантажено 848 кг силосу. Визначено, що довжина подрібнення до середнього розміру часток  $M=43,26$  мм згідно з зоотехнічними вимогами, проходить за час переробки, який повинен бути не менше 9,34 хв (рис. 18).

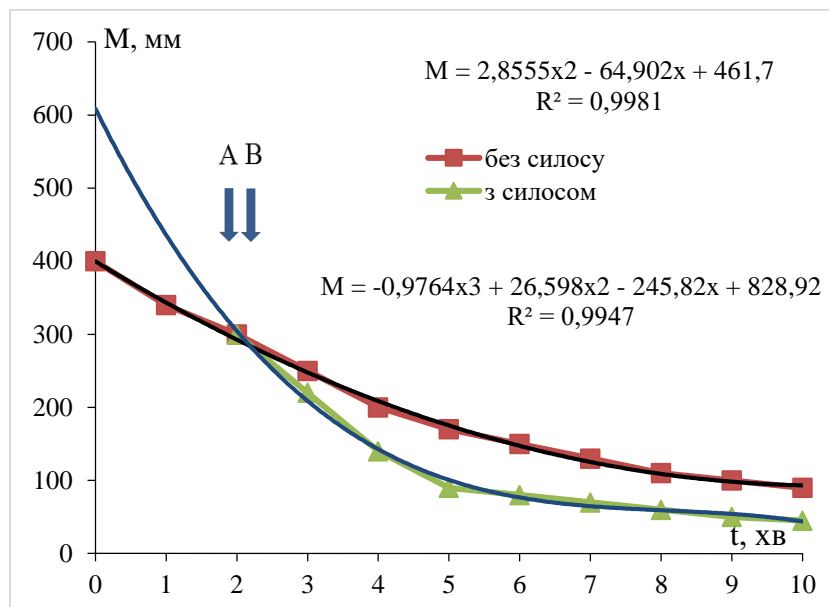


Рис. 18. Зміна розмірів часток соломи в залежності від тривалості подрібнення її в суміші з силосом: А – точка повного руйнування рулону; В – точка додавання силосу

Додавання силосу дозволяє підвищити інтенсивність і ступінь подрібнення соломи за рахунок ущільнення маси в активній зоні різання. Це дозволяє зменшити технологічний час роботи агрегату і збільшити його продуктивність.

Дослідження процесів змішування в мобільному комбінованому кормоприготувальному агрегаті проводилося відповідно до умов, прийнятих при моделюванні. Отримані результати при різних частотах обертання шнека представлено на рис. 19.

Раціональний щодо енергоємності час змішування із одночасним подрібненням становить близько 8,0 хв, а рівномірність змішування кормових компонентів досягає 86,2 % при  $n=25$  хв<sup>-1</sup>.

Аналіз досліджень процесів приготування та роздавання кормової суміші показав, що при частоті обертання шнека 16–20 хв<sup>-1</sup> краще проводити подрібнення грубих кормів в рулонах та паках, а при частоті обертання 25 хв<sup>-1</sup> здійснювати змішування з іншими компонентами. Для самоочищення витків шнеку при частоті обертання 20 хв<sup>-1</sup> та відстані до осі обертання 0,3 м, кут нахилу твірної витків шнека до горизонту має перебувати в межах 29°, а при відстані до осі обертання більше 0,48 м витки шнека набувають горизонтального положення відносно днища бункера мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату. При частоті обертання шнека 25 хв<sup>-1</sup> відбувається самоочищення усіх витків шнека.

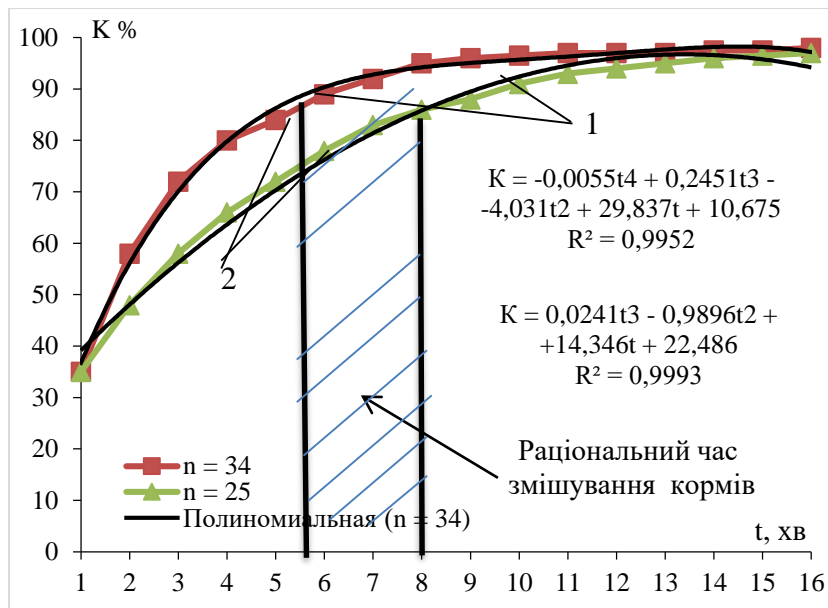


Рис. 19. Залежність рівномірності змішування від тривалості процесу: 1 – результати обчислені аналітичним шляхом; 2 – результати експериментальних досліджень

Порівняння даних теоретичних досліджень (рис. 19, крива 1) з результатами експерименту (рис. 19, крива 2) свідчить, що стабілізація показника рівномірності змішування настає при практично одній і тій же тривалості змішування.

Споживана потужність затрачається на подолання тягового опору машини, а також передається на валу відбору потужності для виконання технологічних операцій з приготування кормової суміші. Тяговий опір причіпного агрегату залежить від його завантаження, швидкості переміщення, виду і стану дорожнього покриття. Так, при русі твердим покриттям швидкістю 8,0 км/год і завантаженням 3,8 т кормової суміші, було зафіксовано максимальний тяговий опір 4,1 кН. Потужність на його подолання склала 5,20 кВт, що становить 7,9 % від загальної потужності двигуна трактора.

У зв'язку з тим, що в процесі подрібнення розмір часток кормового матеріалу в бункері змінюється з плином часу, енергомісткість, що затрачається на цей процес, також змінюється.

В період I (рис. 20) відбувається руйнування рулону і поступове зменшення розмірів часток корму, внаслідок чого зменшується опір, а, отже, і потужність, що споживається на цей процес. Період II інтенсивного подрібнення – частки корму досягли нормованих розмірів. У другій половині періоду кількість часток, що підлягають подрібненню, залишається постійною, спостерігається незначне збільшення споживаної потужності. Період III – збільшується процентне співвідношення часток, які більше не подрібнюються та відбувається їх ущільнення, тому спостерігається збільшення споживаної потужності.

Тривалість кожного періоду залежить від властивостей матеріалу, способу заготівлі, його вологості, а також частоти обертання подрібнювального

апарату (вертикального конічного шнека, оснащеного ножами). Так, при внесенні в бункер маси в розсипному (не в рулоні) вигляді, тривалість періоду I зменшується.

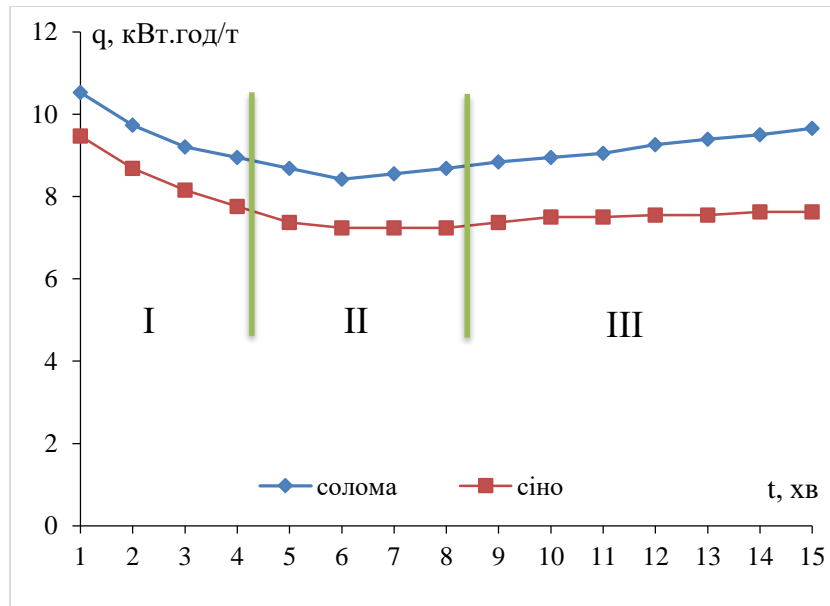


Рис. 20. Залежність енергомосткості від тривалості процесу подрібнення

Отримані рівняння регресії процесу подрібнення та змішування кормів, що відображають:

– енергомосткості процесу  $q$ , кВт год/т (рис. 21):

$$q = 40,11912 + 7,114848 \cdot z - 2,09314 \cdot n - 1,91400 \cdot t + 0,078724 \cdot z \cdot n - 0,208689 \cdot z \cdot t + 0,031228 \cdot n \cdot t - 0,416268 \cdot z^2 + 0,042909 \cdot n^2 - 0,149104 \cdot t^2; \quad (42)$$

– кількості часток кормової суміші заданого розміру  $M$ , % (рис. 22):

$$M = 8,732767 - 3,03435 \cdot z + 3,868519 \cdot n + 2,625041 \cdot t - 0,109460 \cdot z \cdot n + 0,083452 \cdot z \cdot t - 0,016708 \cdot n \cdot t + 0,429469 \cdot z^2 - 0,042078 \cdot n^2 - 0,056428 \cdot t^2; \quad (43)$$

– рівномірності змішування  $K$ , %, (рис. 23):

$$K = -10,1110 - 3,54176 \cdot z + 5,027733 \cdot n + 3,913860 \cdot t - 0,124034 \cdot z \cdot n - 0,004599 \cdot z \cdot t - 0,021895 \cdot n \cdot t + 0,559826 \cdot z^2 - 0,062038 \cdot n^2 - 0,078737 \cdot t^2. \quad (44)$$

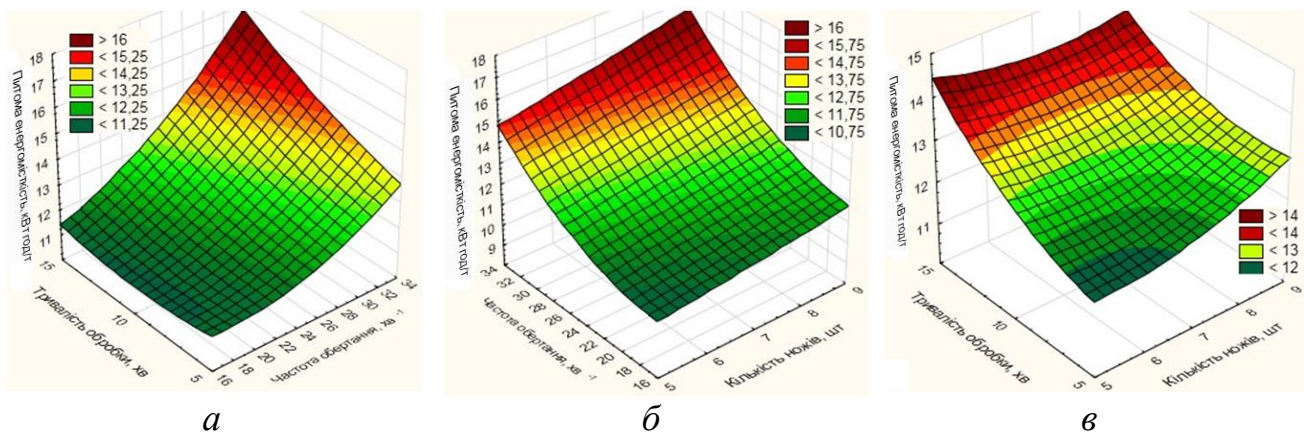


Рис. 21. Залежність енергомосткості  $q$  від: *a* – тривалості обробки  $t$  та частоти обертання шнека  $n$ ; *б* – частоти обертання шнека  $n$  та кількості ножів  $z$ ; *в* – тривалості обробки  $t$  та кількості ножів  $z$

В результаті вирішення компромісної задачі, встановлено такі оптимальні параметри: кількість ножів на подрібнювальному роторі  $z=8$ ; частота обертання ротора  $n=0,42 \text{ с}^{-1}$ ; час змішування  $t=7,0 \text{ хв}$ . При цьому, питомі витрати енергії становлять  $q=10,3 \text{ кВт год/т}$ , кількість часток заданого розміру  $M=87,83 \%$ , а однорідність суміші отриманого продукту  $K=90,52 \%$ .

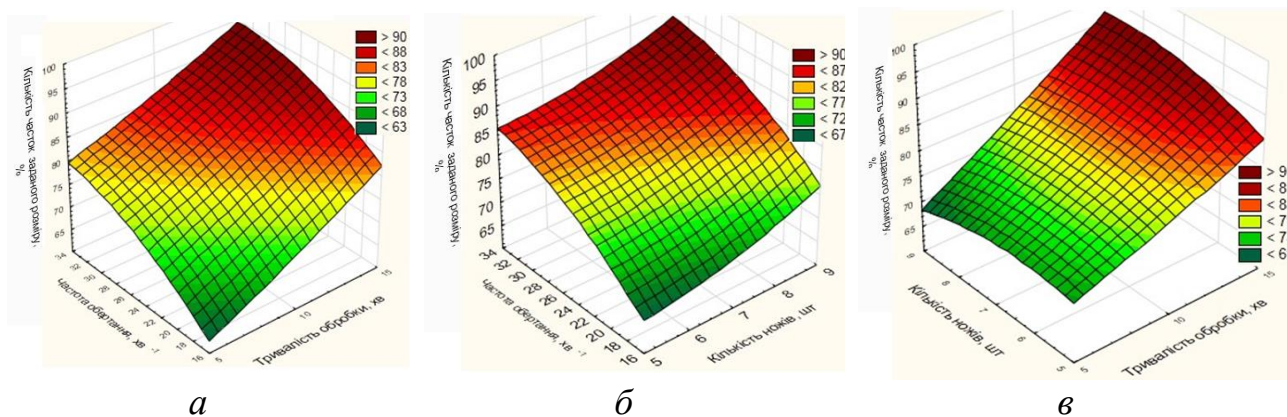


Рис. 22. Залежність кількості часток заданого розміру  $M$  від: *a* – тривалості обробки  $t$  та частоти обертання шнека  $n$ ; *б* – частоти обертання шнека  $n$  та кількості ножів  $z$ ; *в* – тривалості обробки  $t$  та кількості ножів  $z$

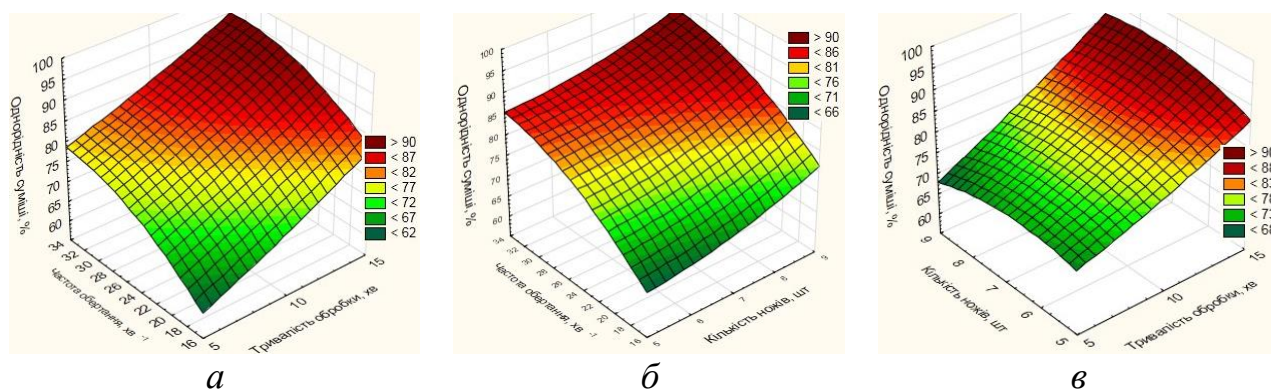


Рис. 23. Залежність рівномірності змішування  $K$  від: *a* – тривалості обробки  $t$  та частоти обертання шнека  $n$ ; *б* – частоти обертання шнека  $n$  та кількості ножів  $z$ ; *в* – тривалості обробки  $t$  та кількості ножів  $z$

Вивантаження кормової маси з бункера відбувається під дією гравітаційного осипання, безпосередньо виштовхування корму нижнім витком шнека і розташованими на ньому ножами. При роздаванні малоподрібнених кормів з низькою щільністю, остання складова є переважаючою. Збільшення частоти обертання конічного шнека сприяє рівномірності видачі, проте, зростає питома енергомісткість (див. рис. 21, рис. 22, рис. 23).

Удосконалений вертикальний конічний шнек з додатковою спіраллю протилежно нижньому витку, збільшує кількість виштовхувальних впливів і дає можливість зрівноважувати консольно закріплений шнек (див. рис. 13) та підвищує рівномірність роздавання до 98,0–98,4 %. Відхилення від норми видачі – 2,0–2,6 % (рис. 24).

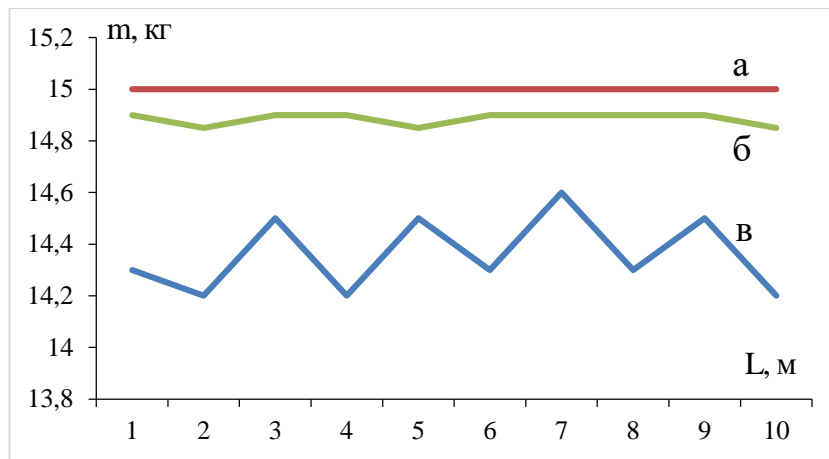


Рис. 24. Маса корму, що видається на метр погонний годівниці: а – розрахункова величина на один метр погонний; б – шнек з додатковим витком, в – шнек без додаткового витка.

У шостому розділі «Реалізація результатів досліджень та їх техніко-економічна оцінка» наведено дані виробничої перевірки експериментального мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату та порівняльну оцінку щодо базового варіанту. Виробничі випробування мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату, розробленого та виготовленого за результатами досліджень, проведено на фермах великої рогатої худоби відокремлених підрозділів Національного університету біоресурсів і природокористування України «Агрономічна дослідна станція» Васильківського району Київської області та «Великоснітинське навчально-дослідне господарство імені О. В. Музиченка» Фастівського району Київської області, в періоди листопад 2015 р., лютий 2018 р. Запропонований варіант дозволяє знизити питомі енерговитрати в 1,3–1,4 раза та підвищити кількість часток заданої розмірної фракції з 85 до 87,7 %, а рівномірність змішування – з 84,9 до 90,6 %.

Річний економічний ефект від впровадження результатів досліджень з розрахунку на 1 т кормової суміші становитиме в 25,8–27,3 грн (у цінах на 01.01.2018 р.). Економія енергозатрат від запропонованої машинної технології та вдосконалень кормоприготувального агрегату становить 2,67–3,44 кВт/т.

## ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що для забезпечення механізації годівлі рогатої худоби доцільним є використання мобільних комбінованих кормоприготувальних агрегатів в поєднанні з прес-підбирачами, що здійснюють попереднє подрібнення грубих кормів до розміру часток 40–60 мм. Вони суміщають операції приготування, доставки і роздавання кормів на кормові столи (у приміщеннях) чи в самогодівниці (на вигульних майданчиках).

2. Визначено коефіцієнт якості кормоприготування  $B_{д.к.р}$ , що враховує рівномірність подрібнення вихідних компонентів та їх змішування, а також його вплив на технологічну ефективність використання кормів тваринами.

3. Уточнено методику розрахунку ліній кормоприготувальних об'єктів, яка включає час, що затрачається на щоденне технічне обслуговування машин та обладнання технологічних ліній.

4. При визначенні пріоритетності подачі кормів в порційні кормоприготувальні машини слід враховувати фізико-механічні характеристики кормових компонентів та технологічні особливості приготування кормової суміші, зокрема, першими необхідно завантажувати ті, які потребують тривалішої обробки – коренеплоди та грубі корми.

5. Виявлено закономірність зміни рівномірності змішування кормових компонентів від фракційного складу стеблових кормів, що дозволило визначити тривалість змішування кормових компонентів для досягнення мінімально-допустимої рівномірності суміші. Так, при переробці довгостеблових кормів середньою довжиною 350–400 мм до рівномірності змішування 85,0 % потрібно не менше 11 хв, а при використанні стеблових кормів, які були попередньо подрібнені до середнього розміру 50 мм, рівномірність змішування настає на 6 хв. При використанні попередньо подрібнених стеблових кормових компонентів, порівняно з неподрібненими, було виявлено скорочення часу приготування однієї порції кормової суміші на 7–12 хв, а рівномірність змішування досягала до 92 %.

6. Аналіз процесів підготовки кормів до згодовування на фермах великої рогатої худоби показав, що кормоприготувальні агрегати з вертикальним розміщенням шнеково-ножового робочого органу забезпечують подрібнення кормів (40–60 мм не менше 85 %), утворюючи гострі поверхні для стимулювання м'язів рубця, а також високу рівномірність змішування (85–93 %) за 6–12 хв.

7. Обґрунтовано раціональну конструкцію бункера мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату, який складається із двох основ: нижня має форму круга, а верхня утворюється із двох радіусів з центрами, віддаленими від осьової нижньої основи на величину  $L/2$ , і набуває форми еліпса, причому величина  $L$  – сторона рівнобедреного трикутника, відстань між боковими стінками рівна діаметру нижньої основи бункера.

8. Обґрунтовано раціональну конструкцію ротора, у вигляді двозахідного конусного шнека, встановленого широкою основою до низу, використання якого дозволяє інтенсифікувати технологічний процес приготування кормів у мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату, підвищити його зрівноваженість та довговічність шин на 16–20 %.

Для підвищення ефективності процесу приготування кормової суміші (показники якості і енергоємність подрібнення та змішування), ножі слід кріпити до гвинтової навивки горизонтально (паралельно площині днища). При цьому, кут загострення ножів повинен становити 25–35°, а форма леза ножа має бути у вигляді дуги ексцентричного кола, яка забезпечує кут ковзання  $\tau=42-43,5^\circ$ . Таке рішення дає економію енергетичних ресурсів на 15–23 %.

9. Одержано математичні моделі, які відображають залежність енергетичних та якісних показників процесу переробки кормів від основних параметрів кормоприготувального агрегату. В результаті вирішення

компромісної задачі, визначено раціональні конструктивно-режимні параметри кормоприготувального агрегату, які залежать від стану вихідних кормових компонентів і становлять: кількість ножів на витках шнека – 8, частота обертання ротора –  $0,4\text{--}0,43\text{ с}^{-1}$ , тривалість обробки компонентів для досягнення 85 % рівномірності змішування – 7 хв.

10. Питомі енергетичні затрати в процесі роботи кормоприготувального агрегату залежать від ступеня подрібнення перероблюваної сировини та її здатності до подрібнення, а також частоти обертання ротора і кількості ножів на витках шнека. Використання запропонованих технічних рішень забезпечує зменшення енергетичних затрат на подолання тертя кормових компонентів по поверхні ножів з 40 % (в існуючих варіантах) до 20–30 % від загального балансу споживаної потужності. В результаті створюються передумови підвищення коефіцієнта корисної дії машини та зниження питомої енергоємності процесу приготування кормів в 1,3–1,4 раза.

11. Одержано математичні моделі, які відображають умови безперервності руху кормової суміші, запобігання заторів та заповнення витків шнека залежно від фізико-механічних властивостей кормових компонентів та параметрів стінки бункера. Кут нахилу стінки бункера знаходиться в межах 21–23°, а умова безперервності обумовлена відношенням площі поперечного перерізу при верхній та нижній основі бункера та відповідно щільністю кормової суміші  $S_{п1} \cdot \rho_1 = S_{п2} \cdot \rho_2$ .

12. Встановлено закономірності зміни розміру часток кормових компонентів від тривалості подрібнення, що дозволила визначити оптимальний час процесу подрібнення кормових компонентів для досягнення заданого середнього розміру часток. Так, щоб переробити коренебульбоплоди до розміру часток 36,0 мм потрібно 23,4 хв, сіна люцерни до розміру 47,0 мм – 10,7 хв, соломи ячменю до 57,0 мм – 13,3 хв. Для інтенсифікації процесу подрібнення коренеплодів їх слід завантажувати в бункер мобільних комбінованих кормоприготувальних агрегатів першими (до додавання до них грубих або силосованих кормів, які виконують функцію амортизатора).

13. В процесі видачі кормової суміші було встановлено, що досягнення необхідної рівномірності видачі суміші (не менше 90–95 %) можливе лише за умови оснащення вертикального конічного шнеку мобільних комбінованих кормоприготувальних агрегатів додатковим витком, встановленим з протилежного боку щодо нижнього витка. При цьому висота відкриття заслінки вивантажувального вікна повинна бути не менше 240 мм, а швидкість переміщення агрегату відносно фронту годівлі – в межах 0,6–1,2 м/с.

14. Обґрунтовано та апробовано методику оцінки рівномірності змішування кормової суміші за перерозподіленням вологи, в процесі перемішування кормових компонентів. Порівнянням фактичної та теоретичної вологості оцінюється рівномірність перемішування кормових компонентів, у зв'язку з цим, зменшується час на отримання результатів досліджень.

15. Виробнича перевірка мобільного комбінованого кормоприготувального агрегату, розробленого за результатами виконаних досліджень, показала, що в разі приготування і роздавання 4–6 т/год кормової

суміші, питомі енергетичні витрати знизилися на 25,9–33,4 %, кількість кормових часток заданого розміру підвищилася з 85 до 89 %, а рівномірність змішування збільшилася з 85 до 91 %. Економія від запропонованої машинної технології та вдосконалень кормоприготувального агрегату становить 2,67–3,44 кВт год/т, за рахунок зниження питомих енергетичних витрат. Крім того, підвищується технологічна ефективність використання кормів при їх споживанні.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Хмельовський В. С. Аналіз пропускнуої здатності комбінованого агрегату для приготування і роздавання кормів. Науковий вісник Національного аграрного університету. 2007. Вип. 115. С. 186–190.

2. Пилипенко О. М., **Хмельовський В. С.**, Василюк В. І. Аналіз способів роздачі кормів на фермах. Науковий вісник Національного аграрного університету. 2007. Вип. 115. С. 56–61. *(Здобувачем здійснено аналіз засобів роздавання кормів та умови їхнього використання).*

3. Костенко В. І., Заболотько О. О., **Хмельовський В. С.** Перспективи використання комбінованого кормоприготувального агрегату для великої рогатої худоби. Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження. 2008. Вип. 12. Т. 1. С. 235–239. *(Здобувачем розглянуто питання приготування кормової суміші для великої рогатої худоби у різних господарствах).*

4. Ревенко І. І., Лісовенко Т. О., **Хмельовський В. С.** Обслуговування рогатої худоби при годівлі за прив'язного утримання. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2008. Вип. 126. С. 254–258. *(Здобувачем запропоновано раціональну лінію обслуговування худоби при годівлі).*

5. Ревенко І. І., Лісовенко Т. О., **Хмельовський В. С.** Мобільні кормороздавачі в сучасних умовах. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2009. Вип. 134. Ч. 2. С. 185–192. *(Здобувачем проведено аналіз виробничої діяльності тваринницьких підприємств).*

6. **Хмельовський В. С.**, Пилипенко О. М., Ачкевич О. М. Класифікація багато-функціональних роздавачів-змішувачів. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2009. Вип. 79. С. 250–258. *(Здобувачем запропоновано класифікацію багатофункціональних роздавачів-змішувачів).*

7. Ревенко І. І., **Хмельовський В. С.**, Белік Д. Ю. Шляхи удосконалення агрегатів для приготування і роздавання кормів рогатій худобі. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2010. Вип. 95. С. 250–258. *(Здобувачем проведено аналіз кормоприготувального обладнання).*

8. Ревенко І. І., **Хмельовський В. С.**, Мельник І. І. Моделювання втрат молочної продуктивності тварин залежно від якості роботи кормо-

приготувальних машин та обладнання. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2010. Вип. 144. Ч. 4. С. 265–272. *(Здобувачем запропоновано методику оцінки кормоприготувального обладнання).*

9. Хмельовський В. С. Методика комплексної оцінки ефективності процесу приготування кормової суміші мобільними кормоприготувальними агрегатами. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2011. Вип. 166. Ч. 1. С. 156–163.

10. **Хмельовський В. С.**, Ачкевич О. М. Формування наукових поглядів про раціональні властивості подрібнених кормів як підґрунтя до вдосконалення фермерських комбікормових агрегатів. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2011. Вип. 166. Ч. 2. С. 259–266. *(Здобувачем розглянуто технологічні схеми заготівлі та підготовки кормових компонентів до згодовування).*

11. Хмельовський В. С. Дизайн – важливий аргумент при виборі засобів для приготування і роздавання кормів на фермах ВРХ. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: технічні науки. 2012. Вип. 11. Т. 2. С. 286–289.

12. Хмельовський В. С. Обґрунтування параметрів бункера кормоприготувального агрегата. Техніка і технології АПК. 2013. № 6. С. 13–15.

13. Шибаніна О. В., **Хмельовський В. С.**, Веселівський К. Д. Аналіз чисельних методів для розв'язку задач прикладної фізики (процесів у сільському господарстві). Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2013. Вип. 182. Ч. 3. С. 208–214. *(Здобувачем запропоновано модель шнекового робочого органу).*

14. Хмельовський В. С. Дослідження типорозмірного ряду бункера кормоприготувального агрегату. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2013. Вип. 13. Т. 3. С. 173–179.

**Статті у наукових фахових виданнях України,  
включених до міжнародних наукометричних баз даних:**

15. Хмельовський В. С. Перспективні технологічні рішення підготовки кормів для згодовування рогатій худобі. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2013. Вип. 185. Ч. 2. С. 390–394.

16. Хмельовський В. С. Обґрунтування встановлення робочих органів багатофункціонального змішувача-роздавача. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. Вип. 196. Ч. 2. С. 201–207.

17. Хмельовський В. С. Огляд технології переробки залишків корму та продуктів життєдіяльності тварин. Науковий вісник Національного

університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. Вип. 212. Ч. 1. С. 270–274.

18. Костенко В. І., Заболотько О. О., **Хмельовський В. С.** Ефективність використання комбінованих транспортно-технологічних засобів для годівлі ВРХ. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. Вип. 212/2. С. 115–122. *(Здобувачем здійснено аналіз технологічних схем, які використовують при годівлі великої рогатої худоби).*

19. Ловейкін В. С., **Хмельовський В. С.**, Гудова А. В. Підвищення ефективності роботи мобільних змішувачів-роздавачів кормів. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: механізація і автоматизація виробничих процесів. 2016. Вип. 10/2 (30). С. 107–111. *(Здобувачем запропоновано імітаційну модель руху агрегату).*

20. Ревенко І. І., **Хмельовський В. С.** Оцінка якості змішування кормів мобільним комбінованим кормоприготувальним агрегатом. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. Вип. 251. С. 91–100. *(Здобувачем подано методику оцінки якості кормів).*

21. **Хмельовський В. С.**, Ачкевич О. М. Дослідження процесу приготування високоенергетичної кормової суміші для ВРХ. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2017. Вип. 262. С. 304–314. *(Здобувачем розглянуто питання приготування кормової суміші з використанням кормових добавок).*

22. Хмельовський В. С. Визначення умов для самоочищення шнекового робочого органу кормоприготувального агрегату. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2018. Вип. 296. С. 149–153.

23. Хмельовський В. С. Забезпечення процесів приготування та роздавання кормів для ВРХ на сімейних фермах. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2018. Вип. 297. С. 135–139.

24. **Хмельовський В. С.**, Ребенко В. І. Обґрунтування елементів біотехнічної системи при виробництві тваринницької продукції. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2018. Вип. 298. С. 79–84. *(Здобувачем запропоновано методику оцінки системи людина – машина – тварина – середовище).*

25. Хмельовський В. С. Дослідження зайнятості мобільних засобів механізації при забезпеченні процесу годівлі тварин. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація і автоматизація виробничих процесів. 2018. Вип. 5 (33). С. 56–60.

26. Хмельовський В. С. Аналіз руху кормової суміші в бункері кормоприготувального агрегату. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2018. Вип. 48. С. 189–197.

27. **Хмельовський В. С.**, Потапова С. Є. Технологічні та технічні передумови приготування якісної кормосуміші для ВРХ. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2018. Вип. 18. Т. 2. С. 248–256. *(Здобувачем запропоновано методу та вказано передумови, які дозволяють досягти високої однорідності кормової суміші).*

28. Хмельовський В. С. Тенденції приготування кормосумішей для корів в умовах тваринницької ферми господарства. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. 2019. Vol. 10. No 1. P. 35–40.

#### **Статті у наукових виданнях інших держав:**

29. Khmelovskyi V. Study of process of cooking a high-energy feed mixtures for cattle. ТЕКА. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. 2018. Vol. 18. No 1. P. 39–43.

30. Khmelovskyi V. Study of process of distributing feed mixture to animals. ТЕКА. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. 2018. Vol. 18. No 2. P. 49–54.

31. Khmelovskyi V. Technical and Economic Substance of Quantity of Animal Feeding. ТЕКА. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. 2019. Vol. 19. No 1. P. 17–20.

#### **Статті у інших виданнях:**

32. Хмельовський В. С. Подрібнювач – змішувач кормових компонентів: брошура. К., 2006. 68 с.

33. Костенко В., Заболотько О., **Хмельовський В.** Кормові суміші – перспективний напрям годівлі великої рогатої худоби. Пропозиція. 2008. № 4. С. 134–136. *(Здобувачем здійснено аналіз годівлі худоби з використанням мобільних засобів).*

34. Ревенко І., Лісовенко Т., **Хмельовський В.** Сучасний ринок засобів роздавання кормів рогатій худобі. Пропозиція. 2008. № 9. С. 106–116. *(Здобувачем здійснено аналіз мобільних роздавачів кормів).*

35. Ревенко І. І., Лісовенко Т. О., **Хмельовський В. С.**, Ревенко Ю. І. Годівниці та пристрої для годівлі тварин: брошура. К., 2009. 56 с. *(Здобувачем здійснено аналіз годівниць).*

36. Ревенко І. І., Лісовенко Т. О., **Хмельовський В. С.**, Ревенко Ю. І. Роздавачі кормів для рогатої худоби: брошура. К., 2009. 200 с. *(Здобувачем здійснено аналіз причіпних роздавачів кормів).*

#### **Патенти України на корисну модель:**

37. Пилипенко О. М., Ревенко І. І., **Хмельовський В. С.** Патент на корисну модель № 3491 Україна, А23N 12/00. Вертикально-шнекова мийка коренеплодів; заявник і патентовласник Національний аграрний університет. № u2004031949; заявлено 16.03.2004; опубліковано 15.11.2004. Бюл. № 11.

*(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано конструкцію мийки).*

38. Пилипенко О. М., **Хмельовський В. С.** Патент на корисну модель № 3492 Україна, A23N 17/00, B01F 7/02. Запарник-змішувач кормів; заявник і патентовласник Національний аграрний університет. № u2004031950; заявлено 16.03.2004; опубліковано 15.11.2004. Бюл. № 11. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано конструкцію системи вивантаження).*

39. Пилипенко О. М., **Хмельовський В. С.**, Чибис С. М. Патент на корисну модель № 3493 Україна, A01F 29/00. Коренерізка; заявник і патентовласник Національний аграрний університет. № u2004031951; заявлено 16.03.2004; опубліковано 15.11.2004. Бюл. № 11. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано конструкцію завантажувальної горловини).*

40. Ревенко І. І., **Хмельовський В. С.** Патент на корисну модель № 17863 Україна, A01K 5/00. Роздавальник кормів; заявник і патентовласник Національний аграрний університет. № u200604382; заявлено 19.04.2006; опубліковано 16.10.2006. Бюл. № 10. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано конструкцію системи вивантаження).*

41. Ревенко І. І., **Хмельовський В. С.**, Лісовенко Т. О. Патент на корисну модель № 23541 Україна, A01K 5/01. Пересувна самогодівниця для стеблових кормів; заявник і патентовласник Національний аграрний університет. № u200701021; заявлено 31.01.2007; опубліковано 25.05.2007. Бюл. № 7. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано конструкцію відкидної годівниці).*

42. Ревенко І. І., **Хмельовський В. С.**, Лісовенко Т. О. Патент на корисну модель № 23543 Україна, A01K 5/01. Пересувна самогодівниця для стеблових кормів; заявник і патентовласник Національний аграрний університет. № u200701023; заявлено 31.01.2007; опубліковано 25.05.2007. Бюл. № 7. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано схему розподілу корму).*

43. Ревенко І. І., Лісовенко Т. О., **Хмельовський В. С.** Патент на корисну модель № 23979 Україна, A01K 5/01. Самогодівниця для стеблових кормів; заявник і патентовласник Національний аграрний університет. № u200701864; заявлено 22.02.2007; опубліковано 11.06.2007. Бюл. № 8. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано конструкцію системи подачі корму).*

44. Ревенко І. І., Лісовенко Т. О., **Хмельовський В. С.** Патент на корисну модель № 24289 Україна, A01K 5/01. Самогодівниця для видачі подрібнених силосованих кормів тваринам; заявник і патентовласник Національний аграрний університет. № u200701421; заявлено 12.02.2007; опубліковано 25.06.2007. Бюл. № 9. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано конструкцію системи очищення годівниці).*

45. Ревенко І. І., Пилипенко О. М., Ревенко Ю. І., Чибис С. М., **Хмельовський В. С.** Патент на корисну модель № 25131 Україна, G01D 21/00. Спосіб оцінки якості змішування сухих сипких компонентів при одночасному їх подрібненні; заявник і патентовласник Національний аграрний університет.

№ u200703292; заявлено 27.03.2007; опубліковано 25.07.2007. Бюл. № 11. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано спосіб оцінки якості змішування).*

46. Ревенко І. І., **Хмельовський В. С.**, Костенко В. І., Лісовенко Т. О. Патент на корисну модель № 33779 Україна, А01К 5/01. Система роздавання кормів рогатій худобі; заявник і патентовласник Національний аграрний університет. № u200802914; заявлено 06.03.2008; опубліковано 10.07.2008. Бюл. № 13. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано конструкцію підгортача кормів).*

47. Ревенко І. І., Ревенко Ю. І., **Хмельовський В. С.**, Лісовенко Т. О. Патент на корисну модель № 33780 Україна, А01К 5/01. Комбінований агрегат для приготування і роздавання кормів; заявник і патентовласник Національний аграрний університет. № u200802915; заявлено 06.03.2008; опубліковано 10.07.2008. Бюл. № 13. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано конструкцію шнекового змішувача).*

48. Ревенко І. І., Лісовенко Т. О., **Хмельовський В. С.**, Ревенко Ю. І. Патент на корисну модель № 33815 Україна, А01К 5/00. Роздавальник кормів; заявник і патентовласник Національний аграрний університет. № u200803300; заявлено 17.03.2008; опубліковано 10.07.2008. Бюл. № 13. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано конструкцію змішувача).*

49. Ревенко І. І., Ревенко Ю. І., Лісовенко Т. О., **Хмельовський В. С.** Патент на корисну модель № 34175 Україна, А01К 5/00. Лінія обслуговування рогатої худоби при годівлі; заявник і патентовласник Національний аграрний університет. № u200804131; заявлено 01.04.2008; опубліковано 25.07.2008. Бюл. № 14. *(Здобувачем здійснено патентний пошук обґрунтовано розміщення машин).*

50. Ревенко І. І., Ревенко Ю. І., Лісовенко Т. О., **Хмельовський В. С.** Патент на корисну модель № 50903 Україна, А01К 5/00. Кормовий стіл; заявник і патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u200913865; заявлено 29.12.2009; опубліковано 25.06.2010. Бюл. № 12. *(Здобувач взяв участь у патентному пошуку та у складанні формули винаходу).*

51. Ревенко І. І., **Хмельовський В. С.**, Пилипака С. Ф. Патент на корисну модель № 62767 Україна, А01К 5/02. Комбінований агрегат для приготування і роздавання кормів з робочим органом двозахідної гвинтової навивки; заявник і патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201102922; заявлено 12.03.2011; опубліковано 12.09.2011. Бюл. № 17. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано конструкцію робочого органу).*

52. Ревенко І. І., Ревенко Ю. І., **Хмельовський В. С.**, Михайлович Я. М. Патент на корисну модель № 63454 Україна, А01К 5/00. Змішувач-роздавач кормів; заявник і патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201102917; заявлено 12.03.2011; опубліковано 10.10.2011. Бюл. № 19. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано конструкцію вивантажувального пристрою).*

53. Ревенко І. І., Ковбаса В. П., **Хмельовський В. С.** Патент на корисну модель № 99502 Україна, А01F 11/00. Установка для визначення властивостей рослинних матеріалів; заявник і патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201413334; заявлено 12.12.2014; опубліковано 10.06.2015. Бюл. № 11. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано конструкцію установки).*

54. Ревенко І. І., **Хмельовський В. С.**, Ревенко Ю. І. Патент на корисну модель № 114748 Україна, G01D 21/00. Спосіб визначення рівномірності змішування кормів; заявник і патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201611979; заявлено 25.11.2016; опубліковано 10.03.2017. Бюл. № 5. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано методику визначення рівномірності змішування кормів).*

#### **Тези наукових доповідей:**

55. Хмельовський В. С. Перспективні напрями підготовки кормової суміші для великої рогатої худоби. Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві: ХХ Міжнародна науково-технічна конференція та Всеукраїнська конференція-семінар аспірантів, докторантів і здобувачів у галузі аграрної інженерії, смт Глеваха, 5–7 травня 2012 року: тези доповіді. Глеваха, 2012. С. 95–96.

56. Хмельовський В. С. Вплив дизайну на вибір засобів для приготування і роздавання кормів на фермах ВРХ. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: ХІІІ Всеукраїнська конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 2013 року: тези доповіді. К., 2013. С. 98–99.

57. Хмельовський В. С. Енергоощадна технологія заготівлі та приготування грубих кормів до згодовування. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: ХІІІ Всеукраїнська конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 2013 року: тези доповіді. К., 2013. С. 99–100.

58. Хмельовський В. С. Покращення якості приготування кормової суміші. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: ХІІІ Всеукраїнська конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 2013 року: тези доповіді. К., 2013. С. 103–104.

59. Хмельовський В. С. Обґрунтування параметрів шнека кормоприготувального агрегату. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: ХІІІ Всеукраїнська конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, м. Київ, 2013 року: тези доповіді. К., 2013. С. 104–105.

60. Хмельовський В. С. Оптимізація обладнання для годівлі ВРХ. Інженерія систем природокористування: І Міжнародна науково-практична конференція в рамках роботи ХІІ Міжнародної агропромислової виставки

«Агрофорум – 2015», м. Київ, 11 листопада 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 61–63.

61. Хмельовський В. С. Енергоощадна технологія годівлі тварин. Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: XVI Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів, присвячена 202-річчю з дня народження Т. Г. Шевченка під гаслом «І чужому навчайтесь, й свого не цурайтесь...», м. Київ, 21–25 березня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 90–91.

62. **Хмельовський В. С.**, Ачкевич О. М. Технологічна схема виробництва високоенергетичної кормової суміші. Інноваційні технології збалансованого природокористування в агропромисловому виробництві: Міжнародна науково-практична конференція, м. Ніжин, 25 березня 2016 року: тези доповіді. Ніжин, 2016. С. 163–169. *(Здобувачем проведено аналіз технологічних схем виробництва високоенергетичної кормової суміші).*

63. Хмельовський В. С. Оцінка якості змішування кормів для ВРХ. Інноваційний розвиток аграрної сфери: IV Міжнародна науково-практична конференція в рамках III Міжнародної спеціалізованої виставки «Київський технічний ярмарок – 2016», м. Київ, 29 березня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 106–107.

64. Хмельовський В. С. Умови забезпечення надійності роботи мобільних змішувачів-роздавачів кормів. Раціональне використання енергії в техніці: XII Міжнародна наукова конференція з нагоди 85-ї річниці від дня народження Момотенка Миколи Петровича (1931–1981), м. Київ, 17–20 травня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 65–68.

65. **Хмельовський В. С.**, Любашевський Є. М. Умови перебування тварин в приміщеннях на фермі ВРХ. Технічне забезпечення виробництва органічної продукції та біопалив в АПК: Міжнародна науково-практична конференція в рамках XXVIII Міжнародної агропромислової виставки «АГРО – 2016», м. Київ, 08–11 червня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 182–183. *(Здобувачем проведено аналіз способів роздавання кормових компонентів тваринам).*

66. Гончар Є. О., **Хмельовський В. С.** Обґрунтування конструкції змішувального пристрою мобільного кормоприготувального агрегату. Сучасні технології аграрного виробництва: II Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 9–10 листопада 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 54–56. *(Здобувачем запропоновано конструкцію змішувального пристрою).*

67. Хмельовський В. С. Напрямок розвитку молочного скотарства. Крамаровські читання: IV Міжнародна науково-технічна конференція з нагоди 110-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906–1987), м. Київ, 16–17 лютого 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 175–176.

68. Хмельовський В. С. Оцінка рівномірності змішування кормів. Обухівські читання: XII Міжнародна науково-практична конференція з нагоди

91-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, академіка АН ВШ України, Обухової Віолетти Сергіївни (1926–2005), м. Київ, 21 березня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 77–79.

69. Хмельовський В. С. Удосконалення агрегатів для приготування і роздавання кормової суміші худобі. Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь: III Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Житомир, 29–30 березня 2017 року: тези доповіді. Житомир, 2017. С. 166–168.

70. Хмельовський В. С., Овчар Р. Ф. Визначення швидкості заповнення простору шнека при змішуванні. Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: виклики для університетів наук про життя: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 23–25 травня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. Т. 5. С. 253–255. *(Здобувачем описано залежність заповнення кормом простору шнека від його частоти обертання та виконано розв'язок рівняння).*

71. Хмельовський В. С. Вплив кормоприготувальних машин та обладнання на молочну продуктивність тварин при годівлі. Інноваційне забезпечення виробництва органічної продукції в АПК: VII Міжнародна наукова конференція в рамках XXXI Міжнародної агропромислової виставки «АГРО – 2019», м. Київ, 04–07 червня 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 129–130.

## АНОТАЦІЯ

**Хмельовський В. С. Науково-технічне забезпечення інтенсифікації приготування і роздавання кормів рогатій худобі.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2019.

Дисертація присвячена інтенсифікації приготування і роздавання кормів рогатій худобі і технічному забезпеченню механізації годівлі тварин, залежно від кількості поголів'я.

Обґрунтовано технологію заготівлі грубих кормів з використанням прес-підбирачів з можливістю подрібнення та приготування кормових сумішок.

Розроблена методика визначення найбільш раціонального набору машин та обладнання для приготування та роздавання кормів рогатій худобі з врахуванням коефіцієнта якості кормової суміші.

Приведено аналітичні дослідження технічного забезпечення при годівлі тварин за зміщеним графіком та обґрунтовано ймовірність виконання процесу. Встановлено, що для забезпечення механізації годівлі рогатої худоби доцільним є використання мобільних комбінованих кормоприготувальних агрегатів.

Обґрунтовано пріоритетність подачі кормів в порційні кормоприготувальні машини з врахуванням фізико-механічних характеристик кормових компонентів та технологічних особливостей приготування кормової суміші.

Доведено, що кормоприготувальні агрегати з вертикальним розміщенням шнеково-ножового робочого органу забезпечують якісне подрібнення кормів, утворюючи гострі крайки для стимулювання м'язів рубця, а також високу рівномірність змішування (87–93 %) за 6–12 хв.

Обґрунтовано раціональну конструкцію ротора, у вигляді двозахідного конусного шнека, встановленого широкою основою до низу, що дозволяє інтенсифікувати технологічний процес кормоприготувального агрегату.

Одержані математичні моделі, які відображають залежність енергетичних та якісних показників процесу підготовки кормів від основних параметрів кормоприготувального агрегату.

Реалізація результатів досліджень забезпечить підвищення коефіцієнта корисної дії машини та зниження питомої енергоємності процесу приготування кормів в 1,3–1,4 рази, при цьому вміст кормових часток заданого розміру підвищиться з 85 до 89 %, а рівномірність змішування збільшиться з 85 до 91 %.

Економія від запропонованої машинної технології та вдосконалень кормоприготувального агрегату становитиме 2,67–3,44 кВт год/т.

**Ключові слова:** кормові компоненти, подрібнення, змішування, коефіцієнт якості кормової суміші, кормоприготувальний агрегат, шнековий змішувальний орган, розміщення ножів, однорідність суміші, роздавання кормової суміші.

## АННОТАЦИЯ

**Хмелевский В. С. Научно-техническое обеспечение интенсификации приготовления и раздачи кормов рогатому скоту.** – На правах рукописи.

Диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.11 «Машины и средства механизации сельскохозяйственного производства». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2019.

Диссертация посвящена интенсификации приготовления и раздачи кормов рогатому скоту и техническому обеспечению механизации кормления животных в зависимости от поголовья.

Обоснованы технологии заготовки грубых кормов с использованием пресс-подборщиков с возможностью измельчения и приготовления из них кормовых смесей, а также элементы биотехнической системы при производстве животноводческой продукции. Разработана методика определения наиболее рационального набора машин и оборудования для приготовления и раздачи кормов рогатому скоту с учетом коэффициента качества кормовой смеси.

Приведены аналитические исследования технического обеспечения при кормлении животных по смещенному графику и обоснована вероятность выполнения процесса.

Установлено, что для обеспечения механизации кормления рогатого скота целесообразно использовать мобильные комбинированные кормоприготовительные агрегаты.

Обоснована приоритетность подачи кормов в порционные кормоприготовительные машины с учетом физико-механических характеристик кормовых компонентов и технологических особенностей приготовления кормовой смеси.

Приведена классификация комбинированных кормоприготовительных агрегатов, разработана методика комплексной оценки эффективности процесса приготовления кормовых смесей мобильными комбинированными кормоприготовительными агрегатами которая дает возможность заранее выявить эффективность использования машин и оборудования для кормления животных.

Доказано, что кормоприготовительные агрегаты с вертикальным размещением шнеково-ножевого рабочего органа обеспечивают качественное измельчение кормов, образуя острые поверхности для стимулирования мышц рубца, а также высокую равномерность смешивания (87–93 %) за 6–12 мин.

Обоснована рациональную конструкцию ротора в виде двухвинтового конусного шнека, установленного широким основанием вниз, что позволяет интенсифицировать технологический процесс кормоприготовительного агрегата, а также установки ножей на шнеке, параметры шнека и форму ножей, что влияет на снижение энергетических показателей процесса приготовления и раздачи кормов.

Полученные математические модели, отражающие зависимость энергетических и качественных показателей процесса подготовки кормов от основных параметров кормоприготовительного агрегата.

Реализация результатов исследований обеспечит повышения коэффициента полезного действия машины и снижение удельной энергоемкости процесса приготовления кормов в 1,3–1,4 раза, а также количество кормовых частиц заданного размера повысится с 85 до 89 %, а равномерность смешивания увеличится с 85 до 91 %.

Экономия от предложенной машинной технологии и усовершенствований кормоприготовительного агрегата составляет 2,67–3,44 кВт/т.

**Ключевые слова:** кормовые компоненты, измельчение, смешивание, коэффициент качества кормовой смеси, кормоприготовительный агрегат, шнековый смесительный орган, размещение ножей, однородность смеси, раздача кормовой смеси.

## ANNOTATION

**Khmelovsky V. S. Scientific and Technical Support of Intensification of Preparation and Distribution of Feed for Horned Livestock. – The Manuscript.**

Theses for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences in Specialty 05.05.11 «Machines and Means of Mechanization of Agricultural Production». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the intensification of the preparation and distribution of feed for cattle and technical support for the mechanization of feeding animals depending on livestock.

The technology of harvesting of coarse fodders with the use of press collectors with the possibility of shredding and preparation of feed mixes is substantiated.

The method of determination of the most rational set of machines and equipment for preparation and distribution of feed for cattle, taking into account the coefficient of quality of a forage mixture, is developed.

The analytical researches of technical provision at feeding animals on the displaced schedule are presented and the probability of the process is substantiated. It has been established that in order to ensure the mechanization of cattle feeding, it is expedient to use mobile combined feed preparation units.

The priority of feeding feed to portions of feed preparation machines is grounded taking into account physical and mechanical characteristics of feed components and technological features of preparation of feed mixture.

It is proved that feed preparation units with vertical placement of screw-knife working organ provide qualitative grinding of forages, forming acute surfaces for stimulation of scar tissue, and also high uniformity of mixing (87–93 %) for 6–12 minutes. The rational design of the rotor, in the form of a two-way cone screw, established from a wide base to the bottom, is substantiated, which allows to intensify the technological process of the feed preparation unit.

Mathematical models are obtained that reflect the dependence of energy and qualitative parameters of the feed preparation process on the main parameters of the feed preparation unit.

The implementation of research results will increase the efficiency of the machine and reduce the specific energy consumption of the feed production process by 1.3–1.4 times, with the content of feed particles of a given size will increase from 85 to 89 %, and the uniformity of mixing will increase from 87 to 91 %.

The savings from the proposed machine technology and improvements to the feed preparation unit will be 2.67–3.44 kWh/t.

**Key words:** feed components, grinding, mixing, quality factor of feed mixture, feed preparation unit, screw mixing organ, placement of knives, homogeneity of the mixture, distribution of feed mixture.

Підписано до друку 15.11.19  
Ум. друк. арк. 1,9  
Наклад 100 прим.

Формат 60x84\16  
Обл.-вид. арк. 1,9  
Зам. № 191072

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України  
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041 тел.: 527-81-55

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2065 від 18.01.2005 р.