

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра процесів, машин і обладнання в агроінженерії

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

ДОВБНЯ ВАДИМ ВІКТОРОВИЧ

УДК 631.3.01

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИХ ЗАДАЧ ПРИ
РОЗРОБЦІ СИВАЛОК ТОЧНОЇ СІВБИ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ В. В. Довбня

Керівник роботи

Грудовий Р. С.

кандидат технічних наук

Житомир – 2021

АНОТАЦІЯ

Довбня Вадим Вікторович. Використання багатокритеріальних задач при розробці сівалок точної сівби. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

У кваліфікаційній праці на прикладі сівалки для високоточної сівби описані порядок розробки, структура і загальний зміст проектування технічних засобів агропромислового комплексу. Наведено основні задачі технічного завдання, вхідні дані для проектування, розглянуто процес розробки функціональної, принципової і кінематичної схеми посівної секції, описані теоретичні залежності, необхідні для технологічного розрахунку сівалок точної сівби і методики виконання розрахунків окремих робочих органів. Наведені аналоги та прототипи сучасних машин, для забезпечення закладання насіння, схеми і креслюнки запропонованих нових робочих органів посівної машини.

Робота може бути використана, як приклад, для виконання курсових робіт і дипломних проектів студентами, які навчаються за спеціальністю – Агроінженерія. В даній роботі проведено ряд дослідень в напрямку вдосконалення машин та їх робочих органів, зокрема, залежність продуктивності машини від низки якісних факторів і показників, яким вона повинна відповідати згідно АТВ та вимог сьогодення.

Сформульовано робочу гіпотезу стосовно можливого покращення техніко-економічних показників роботи МТА та СГА за рахунок розробки та проектування нових висівних апаратів і секцій високої точності сівби просапними сівалками для технічних і олійних сільськогосподарських культур.

Ключові слова: посівна секція, пневматична сівалка, висівний апарат, моделювання, раціональні параметри.

SUMMARY

Dovbnya Vadym. The use of multi-criteria tasks in the development of precision seeders. - Qualification work on the rights of the manuscript. Qualifying work for a master's degree in 208 Agroengineering. - Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

In the qualification work on the example of a seeder for high-precision sowing the order of development, structure and the general maintenance of designing of technical means of an agroindustrial complex are described. The main tasks of the technical task, input data for design are given, the process of development of functional, basic and kinematic scheme of sowing section is considered, the theoretical dependences necessary for technological calculation of seeders of exact sowing and methods of performance of calculations of separate working bodies are described. Analogues and prototypes of modern machines are given to ensure the laying of seeds, diagrams and drawings of the proposed new working bodies of the sowing machine. The work can be used, as an example, to perform term papers and diploma projects by students majoring in Agroengineering. In this work, a number of studies were conducted in the direction of improving machines and their working bodies, in particular, the dependence of machine performance on a number of qualitative factors and indicators that it must meet according to the ATR and today's requirements. A working hypothesis is formulated regarding the possible improvement of technical and economic performance of MTU and AGU due to the development and design of new sowing machines and sections of high precision sowing with row seeders for technical and oilseed crops.

Key words: sowing section, pneumatic seeder, sowing machine, modeling, rational parameters.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ ПНЕВМАТИЧНИХ СІВАЛОК ТА ВИСІВНИХ АПАРАТІВ ТОЧНОЇ СІВБИ	
1.1 Огляд способів сівби сільськогосподарських культур.....	7
1.2 Аналіз конструкцій пневмомеханічних сівалок та х висівних апаратів.....	8
Висновки до розділу 1.....	16
РОЗДІЛ 2	
ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОСІВНОЇ СЕКЦІЇ СІВАЛКИ ДЛЯ ТОЧНОЇ СІВБИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИМ МЕТОДОМ	
2.1 Обґрунтування вибору функціональної схеми сівалки.....	17
2.2 Експериментальний пневматичний висівний апарат із внутрішнім заповненням.....	19
2.3 Обґрунтування мінімального і максимального передаточного відношення приводу барабана.....	20
2.4 Розрахунок робочих органів проектованої сівалки.....	22
Висновки до розділу 2.....	28
РОЗДІЛ 3	
РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ПОСІВНОЇ СЕКЦІЇ СІВАЛКИ	
3.1 Розробка посівної секції сівалки точної сівби.....	29
3.2. Дослідження функціональних параметрів висівного апарату секції пневматичної сівалки	30
Висновки до розділу 3.....	32
ЗАГАЛЬНІ ВИСЕОВКИ.....	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	35

ВСТУП

Актуальність теми. Основним завданням при проведенні сівби полягає в оптимальному розташуванні в ґрунті насінин з метою створення сприятливих факторів формування та розвитку культур і отримання при збиранні максимальної продуктивності та врожаю.

Загальна кількість насіння, що закладається на одиницю площі, визначається, із врахуванням польової схожості насіння, ґрунтово-кліматичних умов, особливостей агротехніки вирощування рослин в даній зоні тощо.

З метою забезпечити раціональні умови для стартового проростання насінин одночасно із сівбою вносять мінеральні добрива та стимулятори природнього та штучного походження.

У випадку проведення точної сівби технічних культур, таких як: кукурудза, цукрові буряки, олійних: соняшник, ріпак, олійна редька, коноплі тощо, виникає необхідність проведення сівби без так званих двійників, тобто без здвоєного висіву насінин, що досить важко забезпечити стандартними висівними апаратами. Тому виникає проблема загущених посівів даних культур, що призводить до зниження показників урожайності зернової частини культур, а лише підвищення стеблової частини і додаткові витрати при сівбі та їх збиранні. Актуальність роботи полягає в потребі удосконалення і розробці та проектуванні висівних апаратів для точної сівби, які з високою ймовірністю проводитимуть закладання насінин без збільшення дози висіву та укладання двійників.

Мета роботи: вирішення багатокритеріальних задач при проектуванні висівних апаратів для точної сівби, пневмомеханічних сівалок.

Задачі роботи:

- провести критеріальний аналіз конструкцій відомих висівних апаратів;
- визначити основні конструкційні параметри апаратів на основі вирішення багатокритеріальних завдань;

- провести теоретичні дослідження впливу зміни якісних критеріїв на параметричні значення конструкції висівних апаратів

Об'єкт дослідження - механізований технологічний процес точної сівби однонасінним апаратом.

Предмет дослідження – вплив багатокритеріальних параметрів висівного апарату для точного висіву технічних культур.

Методи виконання роботи. Дослідження виконувались із використанням методів механіко-математичного моделювання, теорії руху матеріалу по робочих поверхнях, числові багатокритеріальні методи розв'язку задач із застосуванням ПЕОМ.

Перелік публікацій автора за темою роботи:

1. Довбня В. В. Аналіз конструкцій пневмомеханічних сівалок точної сівби / В. В. Довбня, Р. С. Грудовий// Зб. тез допов. Наук.-практ. конф. I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 18 січня 2021 р. Житомир: Поліський національний університет, 2021. – С. 64-67.
2. Довбня В. В. Конструкції висівних апаратів просапних пневматичних сівалок / В. В. Довбня, Р. С. Грудовий // Студентські читання – 2020: Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «Студентські читання – 2020». 26 жовтня 2020 р. Житомир: Поліський національний університет, 2020. С. 470-474.
3. Заєць М.Л. Експериментальний пневматичний висівний апарат із внутрішнім заповненням / М. Л. Заєць, В. В. Довбня// Зб. Тез VI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» 9-10 квітня 2020 р. Житомир: ЖАТК, 2020. С.226-227.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 17 найменування. Загальний обсяг роботи становить 36 сторінок комп'ютерного тексту, 18 рисунків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ ПНЕВМАТИЧНИХ СІВАЛОК ТА ВИСІВНИХ АПАРАТІВ ТОЧНОЇ СІВБИ

1.1 Огляд способів сівби сільськогосподарських культур

Способи сівби класифікуються за двома основними критеріями: розміщення насіння в горизонтальній площині, тобто по ширині міжрядь і розміщення в рядках, і у вертикальній площині, тобто в залежно від профілю поверхні поля. За розміщення насіння і рослин на посівній площі різні культури сіють і садять різними способами (рис. 1.1) [5. ст. 46.]. Рядкова сівба застосовується при сівбі зернових колосових, олійних технічних, плодово-овочевих сільськогосподарських культур. Відстань між рядками становить 10 ... 15 см, а площа живлення рослин - приблизно 2×15 см.

Перехресна сівба - це модифікація рядкової сівби, яку виконують в двох відносно перпендикулярних напрямках з шириною міжрядь 10 ... 15 см. Висівні апарати при цьому регулюють на висів половини дози. Відстань між насінням в ряду збільшується в два рази в порівнянні з відстанню при рядковому посіві. Вузькорядна сівба - це модифікація рядкової сівби зі зменшеною вдвічі шириною міжрядь. Площа живлення однієї рослини ближче до оптимального - в середньому $5 \times 7,5$ см [5. ст. 45.].

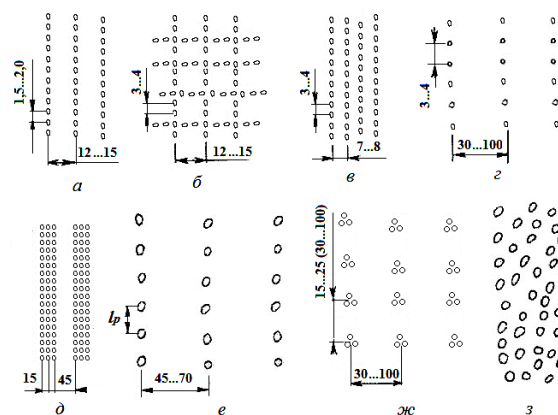


Рис. 1.1. Способи сівби сільськогосподарських культур

а - рядовий; б - перехресний; в - вузькорядний; г - широкорядний; д - стрічковий; е - пунктирний; ж - гніздовий (квадратно-гніздовий); з - розкидний (розміри вказані в см)

1.2 Аналіз конструкцій пневмомеханічних сівалок та х висівних апаратів

На більшості сівалок забезпечених пневматичною централізованою туковисівною системою, єдиний туковий бункер оснащений завантажувачем добрив і розташований за трактором. На деяких машинах він може навішуватися в передній частині трактора (рис. 1.2.). Фронтальний навіс тукового бункера дозволяє змістити центр ваги агрегату і забезпечити його більшу стійкість [1]. На вітчизняних просапних сівалках найбільш поширені групові ємкості, які подають добрива в тукові сошники двох секцій сівалки. Слід сказати про те, що за якістю роботи закордонні сівалки не набагато перевершують вітчизняні зразки, однак, вони відрізняються високою точністю виготовлення і використання в їх конструкціях сучасних матеріалів і технологій виготовлення деталей (лиття в кокіль, деталі з металокераміки і поліамідів, спеціальні профілі, якісні порошкові сталі).



Рис. 1.2. – Сівалка пневматична серії ED фірми «Amazonen-Werke»

На більшості сівалок застосовують груповий привід апаратів, коли від одного колеса приводяться в рух висівні диски кількох апаратів, як правило -

половина від загального числа апаратів на сівалці (для 6 40 12-рядних сівалок). Однак на деяких машинах традиційно використовується індивідуальний привід висівного апарату від заднього прокочуючого котка, це характерно для сівалок РПЛ (рис. 1.3.), сівалок фірми «Franz Kleine» (рис. 1.3. б) [1,2] тощо. Груповий привід висівних апаратів дозволяє спростити процес налаштування сівалки на задану норму висіву насіння, індивідуальний – зменшує ймовірність зміни дози і рівномірності висіву насіння при пробуксовуванні привідних коліс.



Рис. 1.3. – Пневматичні сівалки з центральним туковисівним бункером
a і *б* – сівалки точної сівби «Hatzenbichler»;
в – Сівалка пневматична серії ED фірми «Amazonen-Werke»

Привід туковисівних апаратів на сівалках здійснюється від спеціального приводного колеса, забезпеченого ґрунтозацепам (рис. 1.2.), що дозволяє знизити ймовірність його пробуксовування. Практично всі сучасні просапні сівалки з пристосуваннями або без них можуть здійснювати такі способи сівби: широкорядний; пунктирний і гніздовий. Однією найважливішою класифікаційною ознакою просапних сівалок є принцип дозування насіння. В даний час найбільш розповсюджені пневматичні просапні сівалки. Вони оснащені висівними апаратами, які використовують в процесі роботи пневматику у вигляді розрідження або надлишкового тиску.

За способом агрегатування з тракторами розрізняють навісні та причіпні просапні сівалки. Просапні сівалки з міжряддям 70 см і числом секцій до восьми, а також з міжряддям 45 см і числом секцій до дванадцяти, як правило, проводяться навісними, що дозволяє забезпечити більшу стійкість їх положення відносно напрямку руху трактора. Сівалки з великим числом секцій частіше причіпні (рис. 1.4.) [3].



Рис. 1.4. – Причіпна 36-ти рядна сівалка фірми «John Deere»

В окремих випадках в причіпному варіанті можуть виготовлятися і посівні машини невеликої ширини захвату (рис. 1.5.) [4]. Це дозволяє збільшувати конструктивну масу сівалки, нарощувати об'єм бункерів.



Рис. 1.5. – Сівалка восьмирядова «Great Plains» PD 8070 (з міжряддям 70 см)

При цьому сівалки шириною до 6 м, як правило, виготовляють з цільними рамами, а при більшій габаритній ширині - з секційними (рис. 1.6.).

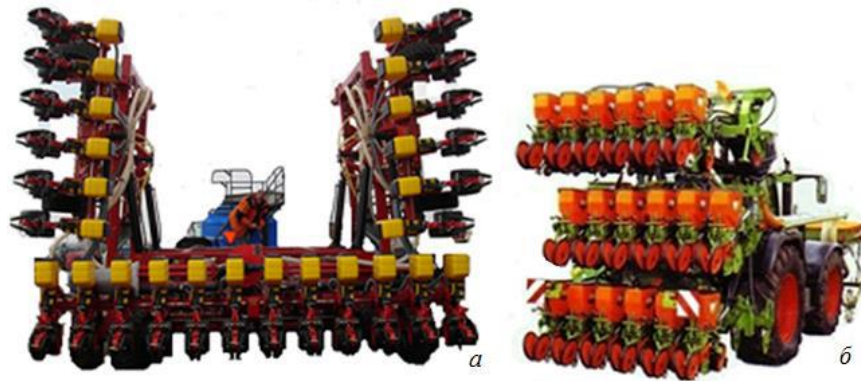


Рис. 1.6. – Сівалки широкозахватні з секційною рамою

a – пневматична сівалка точного висіву «Hatzenbichler»;

б – сівалка точно сівби фірми «Amazonen-Werke»

Пневматичні висівні апарати набули поширення в зв'язку з меншою вимогливістю їх дозаторів до калібрування насіння, що дозволяє використовувати один дозуючий елемент (диск, барабан) з відносно великими отворами для висіву різних фракцій. Перевага пневматичних апаратів також в тому, що вони висівають насіння без пошкодження і не вимагають додаткових пристосувань. Пневматичні сівалки можуть працювати на підвищених швидкостях, мають більш високу надійність технологічного процесу, забезпечують широкий діапазон зміни норм висіву.

Вакуумні апарати поділяються на дискові і барабанні. Найбільшого поширення серед вакуумних апаратів отримали - дискові, з розташуванням отворів по колу на торцевій площині дисків. Апарат такого типу використовується в просапних сівалках типу СУПН-8 та інші використовуваних в нашій країні. Висіваючий диск пневматичного висівного апарату сівалки СУПН-8 (рис. 1.7.*a*) комбінований, складається з корпусу 9 і спеціальної тонкостінної накладки 10, які жорстко з'єднані між собою. Корпус і накладка диска мають отвори, розташовані на колі діаметром 120 мм, причому розміри отворів 11 в накладці менше, ніж в отворів 12 в основі диска.

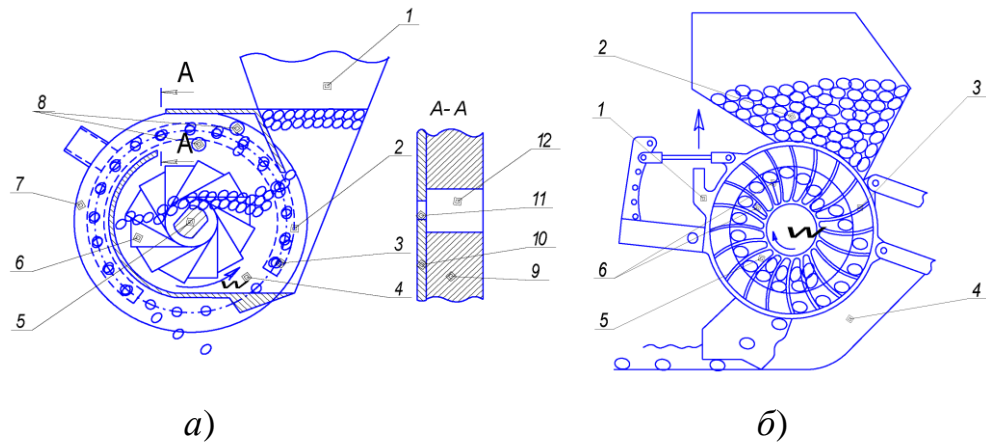


Рис. 1.7. Висіваючий апарат сівалки СУПН-8, і«Ехакта Мат»

Пневматичний висіваючий апарат сівалок «Ехакта Мат» також працює з використанням вакууму (рис. 1.7. б).

Апарат працює в такий спосіб. Насіння з бункера 2 надходять в корпус апарату. Під дією розрідження, створюваного у вакуумній камері 1, вони присмоктуються до отворів, розташованих з внутрішньої сторони обертового висівного диска-обода 5, на бічній стороні якого є сектор з криволінійними напрямними 3. Насіння, що присмокталися до отворів, надходять в зону дії еластичних скидачів зайвого насіння 6, які забезпечують однонасіннєву подачу, видаляючи зайве насіння. Після виходу із зони розрідження насінини потрапляють на напрямні і при подальшому обертанні диска підводяться ними до точки скидання в боріздку, що відкривається сошником 4. Фіксована відстань між напрямними сприяє більш рівномірному інтервалу розміщення насіння в борозні.

Викликає інтерес висіваючий апарат пневматичної сівалки «Walter and Wintersteiger» (рис. 1.8.). Апарат складається з прилеглих один до одного плоских дисків 2 і 3 і співвісного з ними пористого колеса 4, які укладені в загальний корпус, що складається із стулок 1 і 5. В диску 2, який під час роботи нерухомий відносно корпусу апарату, є спіралеподібна щілина, а в обертовому диску 3 зроблені радіальні прорізи. Диск 2 затиснутий між двома стулок 1 і 5 корпусу, утворюючи дві ізольовані одна від одної повітряні камери. У правій камері

встановлено валик 8, що проходить крізь диск 2, на лівому кінці якого закріплений диск 3. Посередині валика насаджена зірочка 9, за допомогою якої приводиться в обертання диск 3. Змінне пористе колесо 4 приєднується до диска 3 і обертається разом з ним.

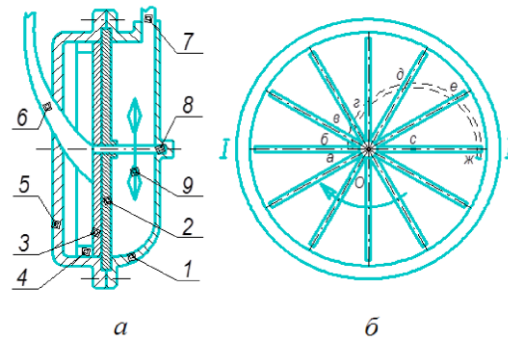


Рис. 1.8. Висівний апарат пневматичної сівалки «Walter and Wintersteiger»

Для дозування по одній насінині порція насіння по трубці 6 подається в ліву частину камери до центру диска 3, а до правої камері по трубці 7 підключається вакуум. При обертанні диска 3, притиснутого до нерухомого диску 2, чергова щілину I перетинає спіраль в точці а, при цьому утворюється наскрізний отвір, до якого під дією вакууму присмоктується одне насіння з порції. При подальшому обертанні диска отвори, утворені перетином щілин, ковзають одночасно уздовж радіального променя і по спіралі, переходячи послідовно положення а, б, в, з, д, е, ж. При переміщенні кожен отвір під дією вакууму захоплює присмоктався до нього насіння, і воно переміщується уздовж радіальної щілини. Коли ж радіальна щілину I займе положення II, кінець її зісковзне з кінця спіралі, тобто зійде з точки ж і наскрізний отвір зникне. Насіння не утримується розрідженням і відпадає від диска і потрапляє в комірку колеса, яке транспортує його в сошник.

Оригінальний висіваючий апарат вакуумного дії застосовується і в сівалці «Miniair» (рис. 1.9.). Його особливість в тому, що в нижній частині висівного диска з боку камери розрідження по траєкторії отворів розташовано видувне сопло. Воно пов'язане з нагнітальним патрубком вентилятора, який в свою чергу з'єднаний з вакуумною камерою висівного апарату. Працює апарат таким чином,

насіння з бункера 2 надходить в дозувальну камеру, під дією вакууму вони потрапляють в отвори висівного диска 4. Зайві насінини з диска видаляє скидає механізм 3, який регулюється так, що біля кожного отвору залишилося по одній насінині. Видалені з диска насінини повертаються в дозуючу камеру через окремий канал. Рухаючись разом з диском 4 насіння падають біля клапана 5, що зменшує вакуум, і через насінняпровід 7 падають в борозну. Заклинені в отворах диска насіння видаляються пружинним виштовхувачем 1 і допоміжною форсункою 6.

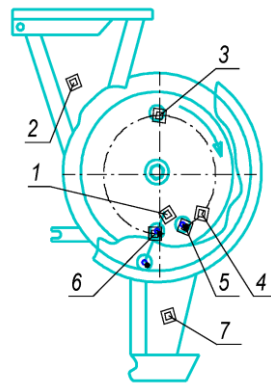


Рис. 1.9. Схема висівного апарата сівалки точної сівби «Miniair»

Робочим органом вакуумного висівного апарату застосовуваного в сівалці «Monosem» (рис. 1.10.), дозуючи однонасіннву подачу насіння в сошник, є комбінований диск 1 з заглибленнями. У боковій стінці кожного поглиблення є два отвори, розташовані по колу різних діаметрів. Потрапляючи з бункера в камеру заповнення насіння захоплюються заглибленнями і виносяться із загальної маси. Коли поглиблення знаходиться в нижньому положенні, різниця тисків існує тільки в зовнішньому отворі. До цього отвору присмоктуються по 2-3 насінини. Виходячи з шару насіння, поглиблення входить в зону вакууму, що діє на обидва отвори 2. При подальшому обертанні диска насіння переміщуються пластинчастим скидачем 3 від зовнішнього до внутрішнього отвору, розміри якого дають можливість захоплення тільки однієї насінини. Зайві насінини повертаються в камеру заповнення. Після виходу поглиблення із зони вакууму

насіння відпадає від внутрішнього отвору і ребром поглиблення 4 підводиться до точки скидання. Висока точність висіву некаліброваного насіння забезпечується, насамперед надійним захопленням заглибленнями насіння з шару, двоступінчастим пневматичним відбором одного з них і фіксуванням інтервалу між насінням в рядку завдяки ребрам, що розділяє поглиблення.

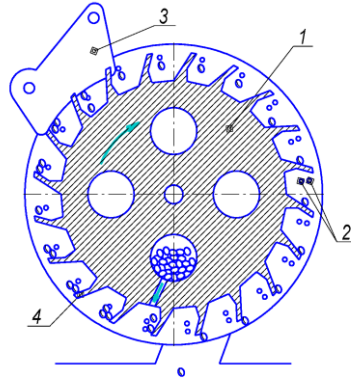


Рис. 1.10. Схема вакуумного висіваючого апарату сівалки «Monosem»

Апарати, що працюють з надлишковим тиском, поділяються на барабанні і дискові. У свою чергу апарати барабанного типу підрозділяються на що подають насіння у внутрішню порожнину барабана або зовні барабана. Найбільше практичне застосування отримав висіваючий апарат фірми «Карл Беккер». Фірма «Карл Беккер» випускає ціле сімейство сівалок точного висіву «Аеромат», оснащених пневмомеханічними висіваючими апаратами, що працюють за принципом «комірка - надлишковий тиск - комірка ». В основному вони використовуються на сівбі великорозмірного насіння округлої форми з гладкою поверхнею (кукурудза, соя, горох, боби, квасоля тощо) [6,8. С. 67-69.]. Основними елементами апарату цієї сівалки (рис. 1.11.) є: бункер 6 для насіння, з ущільнювальною кришкою і заслінкою 5, регулюючої подачу насіння в камеру заповнення, корпус 1, висіваючий диск 3 з наскрізними осередками 2 конусної форми і сопло 4 (насадка для підведення повітря).

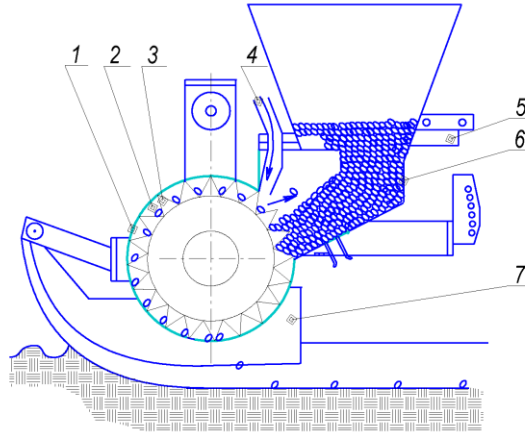


Рис. 1.11. Висіваючий апарат фірми «Карл Беккер»

Висновки до розділу 1

Практично всі сучасні просапні сівалки з пристосуваннями або без них можуть здійснювати такі способи сівби: широкорядний; пунктирний і гніздовий. Однією з найважливіших класифікаційною ознакою просапних сівалок є принцип дозування насіння. В даний час найбільш розповсюдженні пневматичні просапні сівалки. Вони оснащені висівними апаратами, які використовують в процесі роботи пневматику у вигляді розрідження або надлишкового тиску.

Пневматичні висівні апарати набули поширення в зв'язку з меншою вимогливістю їх дозаторів до калібрування насіння, що дозволяє використовувати один дозуючий елемент (диск, барабан) з відносно великими отворами для висіву різних фракцій.

Перевага пневматичних апаратів також в тому, що вони висівають насіння без пошкодження і не вимагають додаткових пристосувань. Пневматичні сівалки можуть працювати на підвищеній швидкості, мають більш високу надійність технологічного процесу, забезпечують широкий діапазон зміни норм висіву.

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОСІВНОЇ СЕКЦІЇ СІВАЛКИ ДЛЯ ТОЧНОЇ СІВБИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИМ МЕТОДОМ

2.1 Обґрунтування вибору функціональної схеми сівалки

Функціональна схема сівалки виконується з метою отримання необхідних вихідних даних для проектування наступних схем, зокрема кінематичної і принципової [10 с. 26.]. В результаті її розробки отримують дані про оживлі моделі конструкції робочих органів, за допомогою яких доцільно здійснювати робочий процес машини, про їхні параметри і режими роботи, про взаємне їх розташування в послідовності здійснення процесу сівки насіння. Зазвичай схема зображується на основі схематичного розрізу з зовнішніми ознаками машини, всередині якого даються спрощені зображення кожного елемента відповідно до його конструкції, а також написи, що пояснюють призначення елементів. На схемі наносяться дані для побудови інших схем (розміри робочих органів, режими їх роботи), функціональні зв'язки (взаємне розташування робочих органів, значення показників функціонування, що характеризують послідовного переміщення насіння з бункера в борозну, відповідно до вимог агротехніки).

Сівалка для точної сівки представляє собою начіпну машину в робочому положенні і причіпну в транспортному. Основні частини сівалки: рама, два опорно - приводних рушія з механізмом приводу висівних апаратів, пневмовисівні секцій, маркерів, причіпного пристрою, начіпного пристрою, вентиляторної пневматичної установки, пневмосистеми. Зварна рама, як за правило виконана у вигляді просторової зварної ферми. У передній частині рами з боків справа і зліва встановлені поздовжні бруси рами. До них приєднують кронштейни маркерів. Рама сівалки спирається на два опорно-приводних рушія з пневматичними шинами і механізму передач на секції робочих органів. Кожен

механізм виконує передачу від опорно-приводного колеса на дев'ять насінневисівних апарати сівалки.

Сівалка оснащена вісімнадцятьма секціями робочих органів. Кожна з цих секцій складається з кронштейна, механізму підвіски, висівного апарату, сошника, опорного колеса, двома загортачами, механізму регулювання глибини ходу сошника. Сошники прикріплені до корпусу висівного апарату за допомогою болтів.

На підставі проведеного аналізу конструкцій сівалок для точної сівби насіння просапних культур в проектній сівалці передбачається встановлення:

- підвіска секції паралелограмна, що покращує копіювання рельєфа ґрунту;
- опорні котки секції регульовані по висоті, що дозволяє точно встановлювати глибину заробки насіння;
- для дозування насіння використовуємо розроблений пневматичний висівний апарат, який не пошкоджує насіння і працює на підвищених робочих швидкостях;
- утворення борозни виконує полозковий сошник, так як володіє високою рівномірністю укладання насіння по глибині;
- загортачем відвального типу, так як добре закривають борозну;
- прогумоване ущільнююче колесо, оскільки воно самоочищається від налипання ґрунту;
- для якісної закриття насіння ґрунтом встановимо V – подібні пальцеві загортачі;
- для створення розрідження в пневмосистемі встановимо вентилятор, який забезпечить тиском повітря 18 посівних секцій.

2.2 Експериментальний пневматичний висівний апарат із внутрішнім заповненням

Однією з найважливіших класифікаційних ознак просапних сівалок точної сівби є принцип дозування насіння. В даний час, найбільш розповсюдженні пневматичні просапні сівалки. Вони оснащені висівними апаратами, які використовують в процесі роботи тиск повітря у вигляді розрідження або надлишкового тиску. Перевага пневматичних апаратів також полягає в тому, що вони висівають насіння без пошкодження і не вимагають додаткових пристосувань. Вакуумні висівні апарати поділяються на дискові і барабанні[7. с. 65, 8 с. 89, 9 с. 4.]. Експериментальний пневматичний висівний апарат із внутрішнім наповненням також має можливість обслуговувати кілька сошників одночасно (рис. 2.1.).

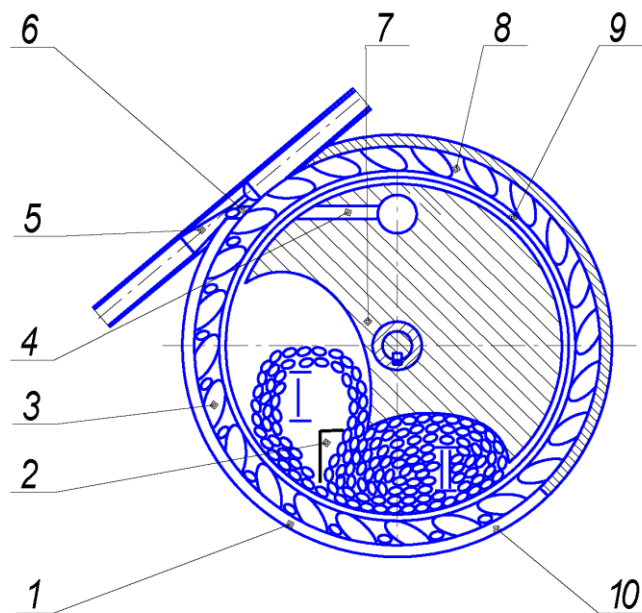


Рис. 2.1. Експериментальний пневматичний висівний апарат

1-корпус; 2-патрубок подачі насіння; 3-барабан; 4-сопло; 5-насіннєпровід;
6-патрубок прийомний; 7-перемичка; 8-похилі комірки; 9-кільцеві ребра; 10-
прорізи.

Апарат включає циліндричний корпус 1, забезпечений патрубком подачі насіння 2, що охоплює перфорований барабан 3, сопло 4 для подачі повітряного потоку, насіннепровід 5 з прийомними патрубками в корпусі і перемичку 7. У барабані виконано кілька рядів циліндричних наскрізних похилих комірок 8 з вхідними фасками. по обидві сторони кожного ряду комірок знаходяться кільцеві ребра 9.

Проти кожного ряду комірок на барабані в корпусі апарату є прорізи 10 для проходу повітря з внутрішньої порожнини через комірку в атмосферу і для утримання однієї насінини в комірці при русі вздовж зон завихрення I і II до приймального патрубка насіннепроводу. Перемичка розділяє внутрішню порожнину апарату на дві зони. У зоні II розташовується насінневий шар, а в зоні I створюється зустрічний аерозерновий вихор. У зоні I відбувається заповнення вільних комірок і одночасно видалення зайвих насінин. Заповнена комірka розвантажується в момент її суміщення з прийомним патрубком в корпусі.

Насіння виштовхується з комірки складовою відцентрової сили і повітряним потоком, створеним розрідженням в приймальному патрубку і тиском потоку повітря з сопла.

2.3 Обґрунтування мінімального і максимального передаточного відношення приводу барабана

З метою підвищення рівня універсальності сівалки при проектуванні необхідно враховувати діапазон норм висіву кількох культур.

Середня кількість дозуючих елементів, які укладають насіння на погонний метр рядка визначається за формулою[6. с. 85.]:

$$n_{cp} = \frac{z \cdot i \cdot (1 - \varepsilon)}{\pi \cdot D}, \quad (2.1)$$

Де z – число отворів в барабані висівного апарату;

i – передаточне відношення від опорно-приводного рушія до висівного барабану;

ε – коефіцієнт проковзування опорного рушія;

D – діаметр опорно-приводного колеса.

Мінімальну і максимальну агротехнічну норму висіву потрібно забезпечити відповідно мінімальної та максимальної середньої подачі насіння.

Тому мінімальне і максимальне передавальні числа будуть визначатись [7. с. 142.]:

$$i_{\min} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{cp \min}}{z \cdot M(1 - \varepsilon)}, \quad (2.2)$$

$$i_{\max} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{cp \max}}{z \cdot M(1 - \varepsilon)}, \quad (2.3)$$

де $n_{cp \min}$, $n_{cp \max}$ – мінімальна та максимальна доза висіву на погонний метр;

M – середня подача насінин на погонний метр, шт.

Крок висіву - крок подачі дози насіння висівним апаратом визначається за формулою [7. с. 143.]:

$$t = \frac{\pi \cdot D}{z \cdot i(1 - \varepsilon)}, \quad \text{м} \quad (2.4)$$

Тоді

$$n_{cp} = \frac{M}{t}. \quad \text{шт/м} \quad (2.5)$$

Норму висіву на одиницю площі можна визначити із залежності:

$$N = \frac{n_{cp} \cdot 10^4}{B}, \quad \text{шт/га} \quad (2.6)$$

де B – ширина міжряддя (відстань між секціями сівалки).

Масову величину дози висіву визначимо за формулою:

$$Q = N \cdot q \cdot 10^6 \cdot \text{кг/га} \quad (2.7)$$

Де q – вага тисячі насінин культури, яка висівається.

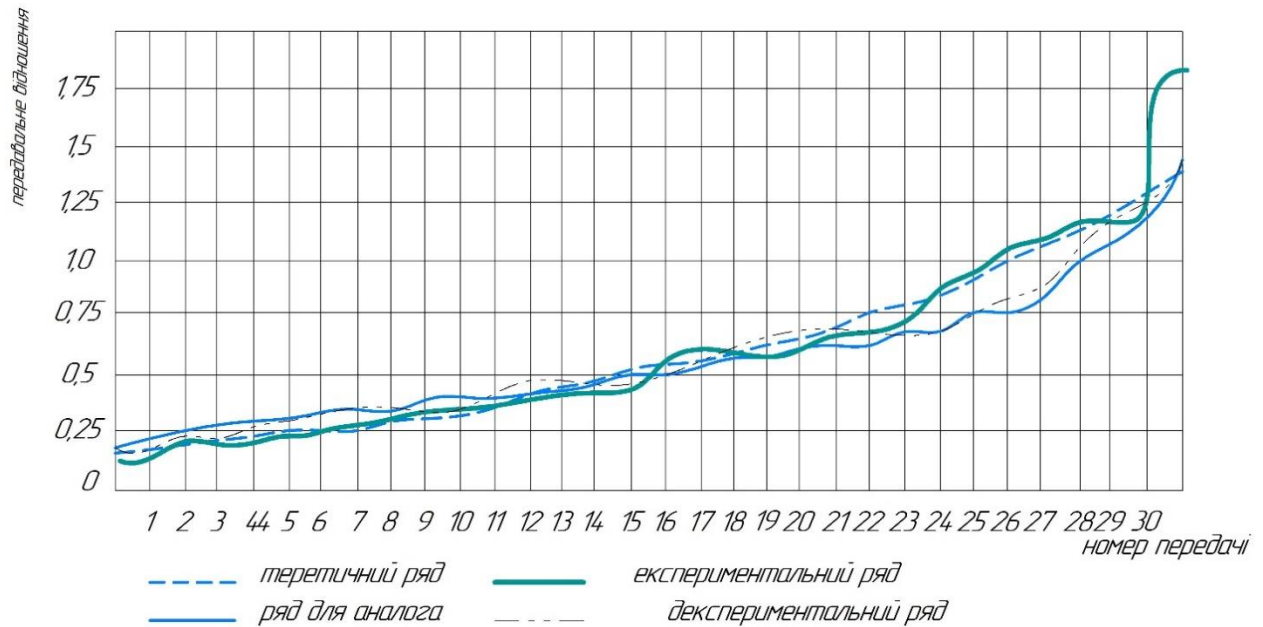


Рис. 2.1. Залежність передавальних відношень

2.4 Розрахунок робочих органів проектованої сівалки

Якість одиничної подачі насіння прямо пов'язане з якістю початкового етапу дозування насіння - присмоктуванням одиничної насінини з шару до отвору висівного диска пневматичного апарата. Найбільш значущими критеріями і факторами, що впливають на перебіг процесу присмоктування насіння до домірки дозувального апарату є фізико-механічні властивості насіння, діаметр отворів, розрідження у вакуумній камері, частота обертання висівного барабана, конструкція і режим роботи зкидача, положення чистика зайвих насіння тощо. Взаємозв'язок деяких факторів можна виявити аналітично.

При роботі висівного апарату в активному шарі насіння протікають взаємодії, які не можуть бути точно описані. Для отримання залежностей, які з високою достовірністю описують процеси, що відбуваються в насінневій камері, скористаємося моделлю сипучого тіла, запропонованої професором Л. В. Гячевим [11]. Модель сипучого тіла представлена на (рис. 2.2.) З урахуванням

даної моделі прийняті такі припущення: - сипуче тіло посівного матеріалу являє собою сукупність однакових, абсолютно твердих куль кінцевого діаметра, покладених шарами з деяким постійним кутом укладання β ; - в процесі руху кульки не можуть рухатися.

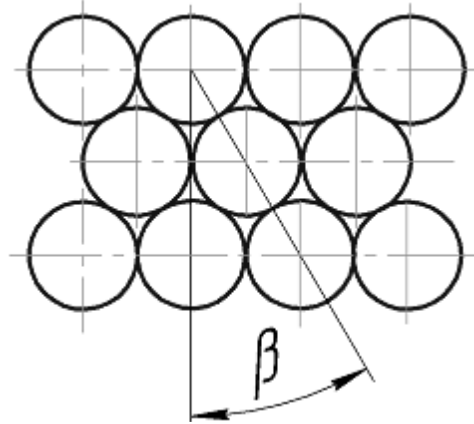


Рис. 2.2. модель сипучого тіла за Гячевим

Обрана модель дозволяє замінити сипуче тіло з довільним розміщенням частинок еквівалентним йому в механічному сенсі сипучим тілом з укладанням частинок шарами, при цьому кут укладання частинок постійний і має середнє значення, укладену в межах $0 \leq \beta \leq 60^\circ$, при достовірних розрахунках цей кут приймають рівним $\beta = 30^\circ$.

Для розрахунку процесу утримання насінини до комірки барабану приймемо наступні припущення [12 с. 5]: - кутова швидкість висівного диска постійна; - присмоктування насіння здійснюється з прилеглого до висівають диску шару, в точках, що лежать на колі, що збігається з траєкторією руху центрів присмоктується отворів; - зміна швидкості руху насіння відбувається за лінійним законом і на шляху, що дорівнює діаметру розташування комірок; - насіння не здійснює руху в напрямку перпендикулярному площини висівного диска.

Процес присмоктування можна вважати завершеним, коли сила тертя поверхні висівного диска по насінині стане рівною по значенню рівнодіючої сил опору:

$$F = R$$

Силу тертя, яка виникає на поверхні барабану висівного апарату визначимо за формулою:

$$F = (R_{нас} + R_n) \cdot f, \quad (2.8.)$$

де $R_{нас}$ – сила тиску насіння верхнього шару на насінину, яка знаходиться в комірці апарату, Н;

R_n – сила присмоктування насінини до комірки барабану, Н;

f – коефіцієнт тертя насінин по матеріалу висівного апарату, за даними

Листопада Г. Є. $f = (0,2 \dots 0,5)$;

Визначимо силу тиску насіння верхнього шару на насінину:

$$R_{нас} = R_N \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (2.9)$$

де R_N – сила нормального тиску шару насіння, Н.

Використовуючи дані Л. В. Гячева, силу нормального тиску шару насіння, для даного випадку, можна визначити з виразу [11 с. 5]:

$$R_N = k \frac{2\gamma \cdot g \cdot r}{(f + f_k) \cdot \operatorname{tg}^2 \beta} \cdot S, \quad (2.10)$$

де k – коефіцієнт, що враховує заповнення камери насінням;

r – радіус насінневої камери (приведений), м;

γ – об'ємна маса насіння, кг/м³;

S – площа поперечного перерізу в місці присмоктування насінини, м²;

f_k – коефіцієнт тертя насіння по матеріалу корпусу апарату, (алюм. сплав).

Визначимо площу поперечного перерізу в місці присмоктування насінини

$$S = k_\phi \frac{\pi d^2}{4}, \quad (2.11)$$

де k_ϕ – коефіцієнт, що враховує форму насінини [12 с. 7];

d – приведений умовний діаметр насінини, м.

$$d = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}. \quad (2.12)$$

де a, b, c – довжина, ширина, та товщина насінини, м.

Силу присмоктування насінини до комірки барабану визначимо з формули:

$$R_n = k \frac{\pi d_0}{4} \cdot H, \quad (2.13)$$

де k – коефіцієнт втрати напору повітря;

d_0 – діаметр отворів комірок барабану, м;

H – розрідження в камері низького тиску висівного апарату, Па.

Діаметр присмоктувальних отворів апарату визначимо за виразом:

$$d_0 = (0,65 \dots 0,75)b,$$

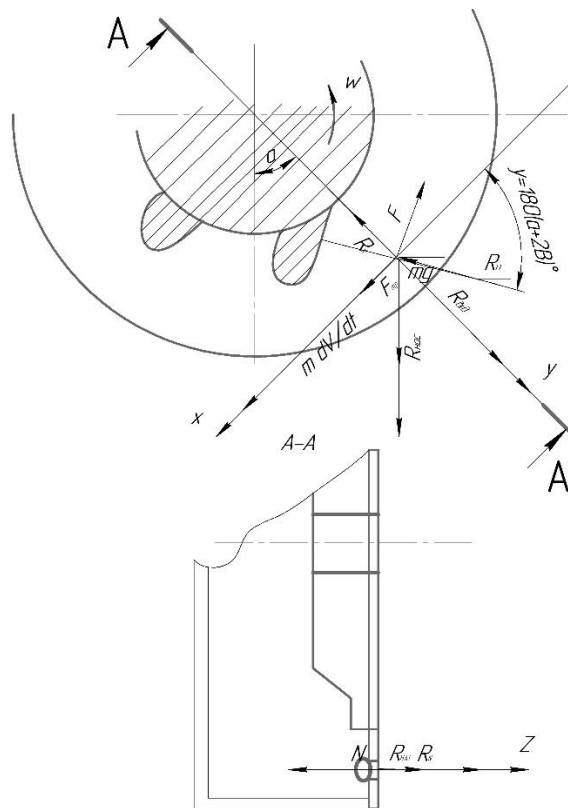


Рис. 2.3. Схема сил, що діють на насінину

Рівнодіюча сил опору визначиться:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}, \quad (2.14)$$

R_x , R_y – проекції рівнодіючої сил опору на вісь x та y .

Тоді

$$R_y = R_{від} + mg \cdot \cos \alpha + R_N \cos \alpha + R_{нид} \cdot \sin[180^\circ - (\alpha + 2\beta)] - R_k, \quad (2.15)$$

де α – кут повороту барабана, ($\alpha = 30 \dots 40^\circ$);

$R_{\text{під}}$ - сила підштовхування насіння зрушувачем, Н;

$R_{\text{к}}$ – сила Коріоліса, Н;

m – маса насінини.

Оскільки розрахунки підтвердили незначні значення відцентрової та коріолісової сили, ними можна знехтувати. Тоді рівняння буде мати вигляд:

$$R_y = mg \cdot \cos \alpha + R_N \cos \alpha + R_{\text{нід}} \cdot \sin[180^\circ - (\alpha + 2\beta)], \quad (2.15)$$

Силу підштовхування насінин зрушувачем можна розрахувати, використавши рівняння запропоноване О. О. Бертовим [13, с. 36]:

$$R_{\text{нід}} = R_N \sin \beta \cdot \sin \delta \cdot \cos(2\beta - \alpha). \quad (2.16)$$

де δ - кут нахилу робочої площини лопаті зрушувача до поверхні висівного барабана, $\delta = 35 \dots 40^\circ$ [10, с. 86].

Складова рівнодіючої сил опору на вісь x , без врахування незначущих критеріїв буде мати вигляд:

$$R_x = R_N \sin \alpha + m \frac{dV}{dt} + F_{\text{в.тр}} + mg \cdot \sin \alpha - R_{\text{нід}} [180 - (\alpha - 2\beta)], \quad (2.17)$$

де $\frac{dV}{dt}$ - дотичне прискорення насінини, м/с²;

$F_{\text{в.тр}}$ – сила внутрішнього тертя насіння, Н.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(\omega \cdot r_{\text{ц.отв}} - \omega \cdot r_{\text{зр.}} \cdot \tau)^2}{d_0}, \quad (2.18)$$

де ω – кутова швидкість обертання барабана, рад/с;

$r_{\text{ц.отв.}}$ - радіус розташування центрів комірок висівного апарату, м;

$r_{\text{зр.}}$ – радіус встановлення зрушувача;

τ – коефіцієнт ковзання насіння, ($\tau = 0,7 \dots 0,8$).

Кутова швидкість обертання вала висівного апарату в залежності від робочої швидкості сівалки запишеться рівнянням:

$$\omega = \frac{V_p}{\pi \cdot D} \cdot i, \quad (2.19)$$

де V_p – робоча швидкість сівалки, м/с.

Зовнішній радіус встановлення зрушувача визначимо із залежності:

$$r_{зр.} = r_{ц.отв.} - d_0 - \Delta, \quad (2.20)$$

де Δ – товщина стінки вакуумно камери насіння, $\Delta = 0,004 \dots 0,006$ м.

Радіус розташування центрів отворів (комірок) висівного апарату визначимо з виразу [10, с. 111]:

$$r_{ц.отв.} = \frac{(d_0 + 2a_{\max}) \cdot Z}{2\pi}, \quad (2.21)$$

a_{\max} – максимальна довжина насінини, м;

Z – кількість отворів на барабані.

Сила внутрішнього тертя насіння запишеться наступним чином:

$$F_{в.тр.} = R_{нас} \cdot tg\varphi_n, \quad (2.22)$$

де φ – кут внутрішнього тертя насіння, град.

З рівнянь отримуємо вирази для визначення мінімального розрідження, необхідного для присмокування однієї насінини до отвору висівного диска з масиву насінин:

$$H_{\min} = \frac{(4R - R_{нас} \cdot f)}{\pi k f d_0^2}. \quad (2.23)$$

Отримана аналітична модель встановлює залежність необхідного розрідження у вакуумній камері апарату від фізико-механічних властивостей насіння (розміри, коефіцієнти тертя, щільність тощо), діаметра отворів, частоти обертання висівного диска, розмірів насінневої камери, параметрів зрушувача тощо.

Висновки до розділу 2

Проаналізувавши вище викладене, можна констатувати, що подальший розвиток конструкцій пневматичних висівних апаратів буде направлено на поліпшення якості дозування насіння і збільшення робочих швидкостей сівби.

Розроблена модель висівного апарата дозволяє проводити сівбу технічних і олійних культур з досить високою точністю при порівнянні з еквівалентним йому в механічному сенсі сипучим тілом з укладанням насінин на задану глибину, при цьому кут укладання постійний і має середнє значення, в межах $0 \leq \beta \leq 60^\circ$, при достовірних розрахунках цей кут приймають рівним $\beta = 30^\circ$.

Отримана аналітична модель залежності основних критеріїв і параметрів робочих органів висівного апарату від фізико-механічних властивостей насіння (розміри, коефіцієнти тертя, щільність тощо), діаметру отворів, частоти обертання висівного диска, розмірів насінневої камери, параметрів зрушувача насіння тощо.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ПОСІВНОЇ СЕКЦІЇ СІВАЛКИ

3.1 Розробка посівної секції сівалки точної сівби

За прототип для створення секції сівалки була обрана сівалка точного висіву ED 9000-T компанії AMAZONE (рис 3.1.). Принцип роботи посівної секції полягає в наступному. Насінини, з висівного апарату через насіннепровід, з великим прискоренням за рахунок потоку повітря на високій швидкості потрапляють в сошник 4. Коток 3 м'яко захоплює насіння і з зусиллям вдавлює їх у посівну борозенку підготовлену боріздоущільнювачем 5. Таке розділення на модулі дозування і висіву, забезпечує надійне укладання посівного матеріалу навіть при високій робочій швидкості (15 км / год).

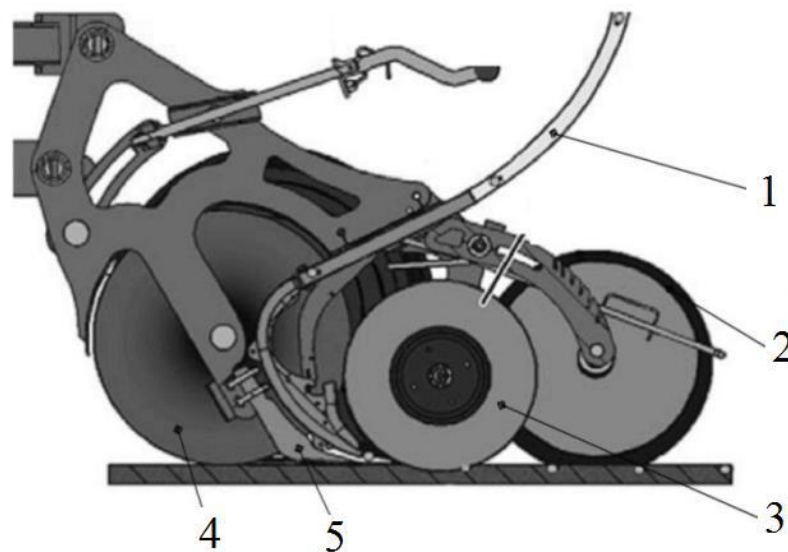


Рис. 3.1. - Посівна секція сівалки точного висіву серії ED фірми
«Amazonen-Werke»

1 - насіннепровід; 2 – коток копіювальний; 3 –коток захоплювач; 4 – сошник дисковий висівний; 5 – боріздкущільнювач насінневий з пневмопроводом.

3.2. Дослідження функціональних параметрів висівного апарату секції пневматичної сівалки

В процесі проектування роботи висівного апарату та пневмотранспортувальної системи секції сівалки, за допомогою ПЕОМ зроблено обґрунтування діаметра пневмопроводу між висівним диском та пневмолінією, з врахуванням критерію текучості насіння (рис. 3.2.) (обирали насіння сої, та соняшника).

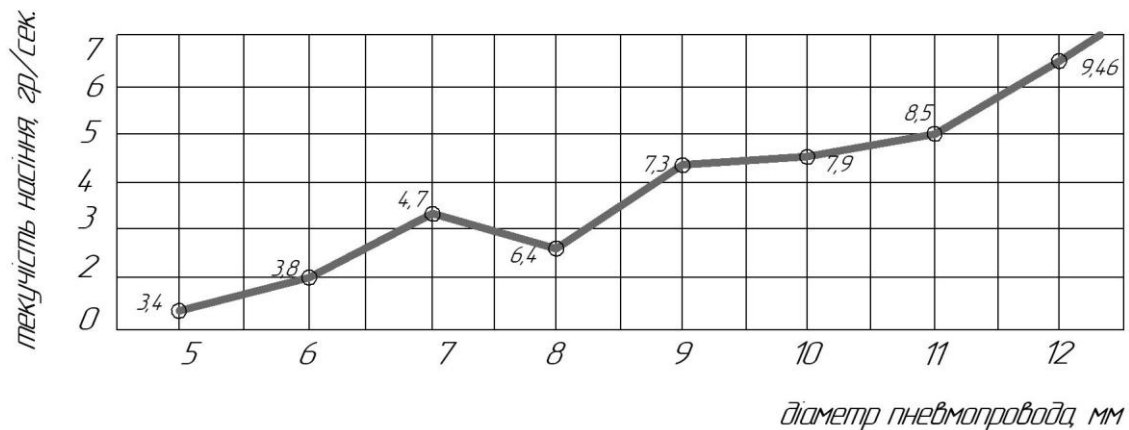


Рис. 3.2. Залежність подачі висівного апарату від діаметра пневмопроводу

Встановлено, що для забезпечення середньої дози висіву технічних культур 30...60 кг/га необхідно встановлювати пневмопровід діаметром $d = 8$ мм, при подачі повітря зі швидкістю $V = 10,0...15,0$ м/с .

Необхідну подачу насіння визначали за допомогою моделі (3.1)

$$Q = 10^{-6} (S_n \cdot Z \cdot \mu + \pi \cdot D_k \cdot (1 - e^{b_0 / b_0})) \cdot m \cdot \gamma_n, \quad (3.1)$$

де S_n - площа поперечного перерізу пневмопроводу, мм²;

Z - кількість отворів висівного барабану;

μ - коефіцієнт заповнення апарату насінням;

e - основа натурального логарифма;

b_0 - коефіцієнт пропорційної відповідності насінин (для технічних культур 0,32...0,35);

D_k – діаметр висівного арабану , мм;

m – кількість рядків комірок висівного барабану;

$\gamma_{п.м.}$ – об’ємна маса посівного матеріалу, $г/дм^3$;

Виходячи з досліджень [14-17] швидкість МТА може варіюватися в межах $V_{ag} = 4,2-5,3$ м/с, нами отримані параметри, які з високою достовірністю задовільняють задану дозу сівби матеріалу $q_n = 120 \dots 140$ тис. шт/га для середньорозмірних насінин технічних культур: площа поперечного перерізу пневмопроводу $S_n = 50,24$ мм²; кількість комірок $Z = 24$, зовнішній діаметр барабану $D_k = 180$ мм, кількість рядків комірок висівного барабану $m = 1$, частота обертання диска барабана $n = 1,2$ с⁻¹ (72 хв⁻¹). За допомогою моделі (3.1) визначили подачу насіння, яку апарат висіває за один оберт, яка складає 28-29 шт/об. Оскільки кутова швидкість диска висівного апарата (формула (3.2)) змінюється залежно від швидкості сівалки і дози сівби, необхідно встановити закономірність зміни даних критеріїв (рис. 3.3, 3.4).

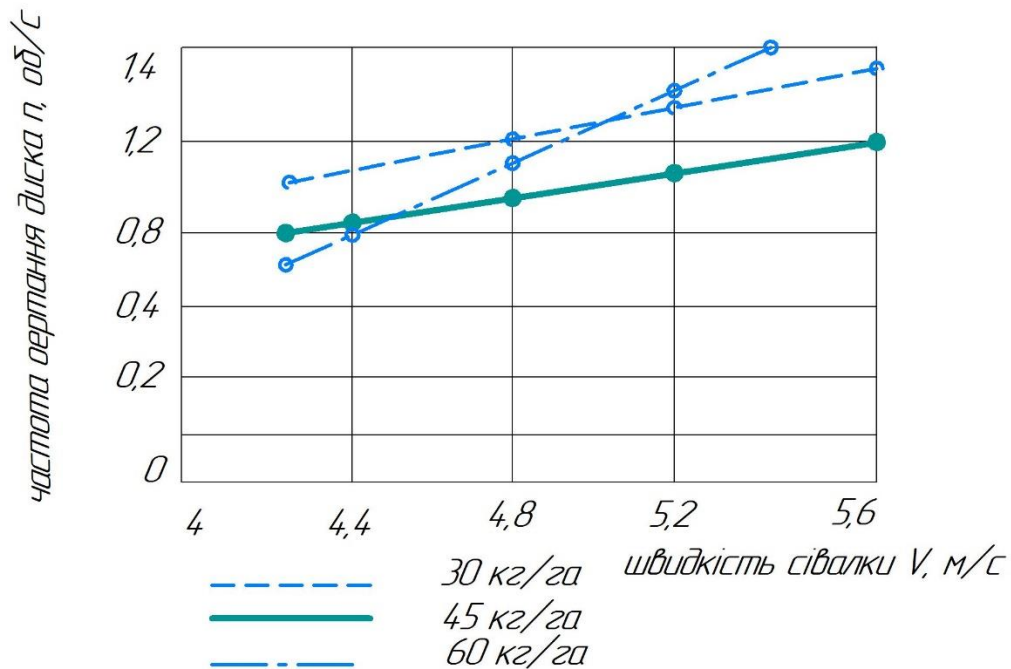


Рис. 3.3. Залежність частоти обертання висівного диска від робочої швидкості посівного агрегата

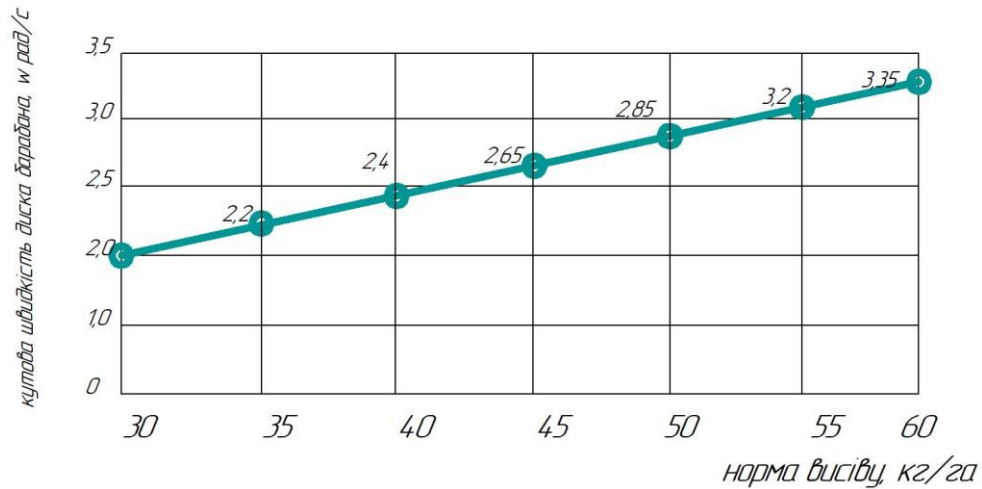


Рис. 3.4. Залежність норми висіву насіння від кутової швидкості диска висівного апарату

Зрозуміло, що забезпечення сталої відрегульованої дози сівби зі зростанням швидкості руху посівного МТА кутова швидкість висівного апарату повинна зростати. Подачу насіння регулюємо з врахуванням коефіцієнта сипучості насіння та заданої норми сівби з розрахунком польової схожості насіння та критерія оптимізації роботи пневмовисівного апарату. Аналізуючи графічну залежність (рис. 3.4) можна зробити наступний висновок, що залежність норми висіву насіння від кутової швидкості диска висівного апарату, при знехтуванні незначущих факторів носить лінійний характер, чого і прагнули досягнути при вирішенні багатокритеріальної задачі .

Висновки до розділу 3

1. Виходячи з досліджень отримані параметри, які з високою достовірністю задовільняють задану дозу сівби матеріалу $q_n=120\dots140$ тис. шт/га для середньорозмірних насінин технічних культур: площа поперечного перерізу пневмопроводу $S_n = 50,24$ мм²; кількість комірок $Z = 24$, зовнішній діаметр барабану $D_k = 180$ мм, кількість рядків комірок висівного барабану $m = 1$, частота обертання диска барабана $n = 1.2$ с⁻¹ (72 хв⁻¹). За допомогою моделі (3.1)

визначили подачу насіння, яку апарат висіває за один оберт, яка складає 28-29 шт/об.

2. Зрозуміло, що забезпечення сталої відрегульованої дози сівби зі зростанням швидкості руху посівного МТА кутова швидкість висівного апарату повинна зростати. Подачу насіння регулюємо з врахуванням коефіцієнта сипучості насіння та заданої норми сівби з розрахунком польової схожості насіння та критерія оптимізації роботи пневмовисівного апарату.

Аналізуючи графічну залежність (рис. 3.4) можна зробити наступний висновок, що залежність норми висіву насіння від кутової швидкості диска висівного апарату, при знехтуванні незначущих факторів носить лінійний характер, чого і прагнули досягнути при вирішенні багатокритеріальної задачі .

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Пневматичні висівні апарати набули поширення в зв'язку з меншою вимогливістю їх дозаторів до калібрування насіння, що дозволяє використовувати один дозуючий елемент (диск, барабан) з відносно великими отворами для висіву різних фракцій.

Перевага пневматичних апаратів також в тому, що вони висівають насіння без пошкодження і не вимагають додаткових пристосувань. Пневматичні сівалки можуть працювати на підвищеній швидкості, мають більш високу надійність технологічного процесу, забезпечують широкий діапазон зміни норм висіву.

2. Розроблена модель висівного апарата дозволяє проводити сівбу технічних і олійних культур з досить високою точністю при порівнянні з еквівалентним йому в механічному сенсі сипучим тілом з укладанням насінин на задану глибину, при цьому кут укладання постійний і має середнє значення, в межах $0 \leq \beta \leq 60^\circ$, при достовірних розрахунках цей кут приймають рівним $\beta = 30^\circ$.

Отримана аналітична модель залежності основних критеріїв і параметрів робочих органів висівного апарату від фізико-механічних властивостей насіння (розміри, коефіцієнти тертя, щільність тощо), діаметру отворів, частоти обертання висівного диска, розмірів насінневої камери, параметрів зрушувача насіння тощо.

3. Виходячи з досліджень отримані параметри, які з високою достовірністю задовільняють задану дозу сівби матеріалу $q_n = 120 \dots 140$ тис. шт/га для середньорозмірних насінин технічних культур: площа поперечного перерізу пневмопроводу $S_n = 50,24$ мм²; кількість комірок $Z = 24$, зовнішній діаметр барабану $D_k = 180$ мм, кількість рядків комірок висівного барабану $m = 1$, частота обертання диска барабана $n = 1.2$ с⁻¹ (72 хв⁻¹). За допомогою моделі (3.1) визначили подачу насіння, яку апарат висіває за один оберт, яка складає 28-29 шт/об.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пневматична посівна техніка [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.amazone.ru/97.asp>.
2. Пневматична посівна техніка [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hatzenbichler.com/de/>
3. Пневматична посівна техніка [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.deere.ua/uk/посів/просапні-сівалки.html>
4. Пневматична посівна техніка [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.greatplainsint.com/uk/implements/ukraine/air-drills>
5. Сисолін П. В. та ін. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи конструкція, проектування: Підручник для студентів вищих навчальних закладів із спеціальності «Машини та обладнання с.г. виробництва» (За ред. М.Г. Черновола). – Кн.1. К.: Урожай, 2001.-384с.
6. Кленин, Н.И., Сакун В.А. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Н.И. Кленин, В.А. Сакун. – Москва; Колос,1994. – С. 204–236.
7. Халанский, В.М. Сельскохозяйственные машины / В.М. Халанский, И.В. Горбачев. – Москва: Колос, 2003. – 624 с.
8. Кленин, Н.И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Н.И. Кленин, В.Г. Егоров. – Москва: Колос, 2003. – 464 с.
9. Schunke, U. Einzelkorns ger te [Text] / U. Sch nke // Agrartechnik.- 1991. - № 11. - P. 122-128.
10. Основи проектування сільськогосподарських машин / Ю. І. Ермольєв і ін. - Тула: Гриф, 2006. - 638 с.
11. Гячев, Л. В. Про механічні моделі сипучого тіла / Л. В. Гячев // Механіка сипучих матеріалів: тези доповідей Всесоюзної конференції. - Одеса, 1975. - С. 3-4.
12. Несміян, А. Ю. Удосконалення технологічного процесу висіву насіння гарбузів апаратом пневматичної сівалки: автореферат дисертації на здобуття

наукового ступеня кандидата технічних наук / А.Ю. Несміян. - зерноград, 2002. - 19 с.

13. Бертов, О. О. Обґрунтування раціональної конструкції ворушилки пневматичного висівного апарату / О. О. Бертов // Трактори і сільськогосподарські машини. - 1986. - № 5. - С. 34-35.

14. Бойко А. І., Свірень М. О. Модель функціонування пневматичної висівної системи для технологій точного землеробства. Київ. Науковий вісник НАУ. 2006. Вип. 18. С. 80-18.

15. Моделирование сельскохозяйственных агрегатов и их систем управления. Под ред. А. Б. Лурье. Ленинград. Колос. Ленинградское отд-ние. 1979. 321 с.

16. Василенко П. М., Василенко В. П. Методика построения моделей функционирования машинных агрегатов. Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. № 12. 1979. С. 42-45.

17. Аніскевич Л. В. Управління системами високоточного дозування технологічних матеріалів. Техніка та енергетика. Науковий вісник НУБіП. 2014. С. 264-277.