

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

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ГРУНИЦЬКИЙ МАКСИМ РОМАНОВИЧ

УДК 631.531.01:631.544.4:633.63

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОСІВУ ЦУКРОВИХ
БУРЯКІВ ПНЕВМАТИЧНИМ ВИСІВАЮЧИМ
АПАРАТОМ**

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

_____ Груницький М. Р.

Керівник роботи

Савченко В.М.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Груницький Максим Романович. Дослідження процесу посіву цукрових буряків пневматичним висіваючим апаратом. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

В магістерській роботі розроблений розподільник, який забезпечує розподіл насіння на дві стрічки із середнім інтервалом розміщення у лівій та правій стрічках відповідно 18,8 і 18,6 см за розрахункового інтервалу 18,2 см. Коефіцієнт варіації розміщення насіння для лівого та правого рядів становить 17,9 і 19,2 %, що підтверджує наявність нормального розподілу в стрічці.

Розподільник насіння на два потоки від одного висівного апарата необхідно обладнати збірним лотком подачі насіння у повітряну камеру, форма якого описується рівнянням $f(x) = 100x^2 - 6x + 0,09$, довжиною 0,035 м, висотою 0,1 м зі зміщенням у поздовжній вертикальній площині на 0,005 м від місця виходу насіння. Вихідні відводи розподільника, нахилені відносно горизонтальної лінії у поперечному напрямку на 45° , встановлюються зі зміщенням щодо центра висівного апарата на 0,075 м. При цьому сумарний час руху насіння в розподільнику з моменту відриву від диска до виходу з лівого та правого відводів становить відповідно 0,404 та 0,398 с.

Якісна робота розподільника забезпечується нагнітальним повітряним потоком у повітряній камері діаметром 0,01 м при тиску 0,15...0,17 МПа, причому кутова швидкість диска не повинна перевищувати 2 рад/с.

Ключові слова: насіння, розподільник, висівний апарат, цукровий буряк, потік, стрічка.

ANNOTATION

Hrunytskyi Maksym Romanovych. Research on the Sugar Beet Sowing Process Using a Pneumatic Seed Metering Device. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

In the master's thesis, a distributor was developed that ensures the division of seeds into two bands with an average placement interval of 18.8 and 18.6 cm in the left and right bands, respectively, at a calculated interval of 18.2 cm. The coefficient of variation of seed placement for the left and right rows is 17.9% and 19.2%, which confirms the presence of a normal distribution within the bands.

The distributor that divides seeds into two flows from a single seed metering device must be equipped with a collecting chute for supplying seeds into the air chamber. Its shape is described by the equation $f(x) = 100x^2 - 6x + 0.09$, with a length of 0.035 m and a height of 0.1 m, and shifted in the longitudinal vertical plane by 0.005 m from the point where the seeds exit. The outlet ducts of the distributor, inclined at 45° relative to the horizontal line in the transverse direction, are installed with a 0.075 m offset from the center of the seed metering device. In this configuration, the total travel time of the seeds inside the distributor from the moment they detach from the disk until they exit the left and right ducts is 0.404 s and 0.398 s, respectively.

The high-quality operation of the distributor is ensured by a pressurized airflow in the air chamber with a diameter of 0.01 m at a pressure of 0.15–0.17 MPa, while the angular velocity of the disk should not exceed 2 rad/s.

Keywords: seeds, distributor, seed metering device, sugar beet, flow, band.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 5 |
| РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ..... | 9 |
| 1.1. Особливості вирощування цукрових буряків у насінництві..... | 9 |
| 1.2 Можливість використання існуючих машин і розробок у виробництві штеклінгів..... | 16 |
| РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РОЗДІЛЮВАЧА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ..... | 24 |
| 2.1. Обґрунтування параметрів розділювача для дворядкового висіву..... | 24 |
| 3.2 Опис лабораторних установок для проведення досліджень..... | 26 |
| 2.3 Методика експериментальних досліджень..... | 32 |
| РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ..... | 37 |
| 3.1 Визначення коефіцієнта присмокткування насіння до висівного диска..... | 37 |
| 3.2 Дослідження якісних показників роботи висівного апарата залежно від швидкості обертання диска та глибини розрідження..... | 38 |
| 3.4 Експериментальні дослідження з розподілу насіння цукрових буряків розподільником потоку до висівного апарата..... | 44 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... | 51 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 53 |

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Насінництво цукрових буряків є важливим напрямом агропромислового комплексу, оскільки використання якісного насіннєвого матеріалу суттєво впливає на урожайність коренеплодів. Для зміцнення технологічного суверенітету у сфері буряківництва необхідно збільшити на ринку кількість і якість посівного матеріалу вітчизняного виробника. Проте наявні способи висіву цукрових буряків на насіннєві цілі мають певні недоліки, пов'язані з формуванням раціональної густоти рослин.

Вченими ННЦ ІМЕСГ розроблена технологія загущеного вирощування насінників цукрових буряків із міжряддями 45+15 см [2]. Запропонована технологія дає змогу отримувати коренеплоди масою близько 150 г, тобто так звані штеклінги, які забезпечують більший вихід насіння порівняно з класичними маточниками масою понад 300 г. Беззаперечною перевагою є більша норма висіву насіння на гектар, що дозволяє отримати більшу кількість маточників на полі, ніж за посіву з міжряддям 45 см, а також зменшити витрати на зберігання завдяки їхнім меншим розмірам. Однією з основних проблем під час вирощування штеклінгів є відсутність сівалок, що дають змогу реалізувати запропоновану схему розміщення міжрядь 45+15 см.

Виходячи з вищесказаного, одним із актуальних напрямів упровадження схеми міжрядь 45+15 см є розроблення посівних машин, здатних здійснювати висів дражованого насіння цукрових буряків у дві стрічки з відстанню між ними 15 см і розміщенням насінин у шаховому порядку одна відносно одної. Виготовлення окремої сівалки, яка виконувала б висів за такими вимогами, нині

є нерентабельним, оскільки ринок збуту для неї буде незначним. Тому ми вважаємо доцільним піти шляхом підвищення універсальності вже наявних у господарствах сівалок і розробити пристосування, що дозволяє здійснювати висів насіння цукрових буряків стрічковим способом з однієї висівної секції.

Магістерська робота присвячена розробленню й обґрунтуванню конструкції розподільника потоку для висівного апарата сівалки точного висіву, який дає змогу здійснювати посів дражованого насіння цукрових буряків стрічковим способом одним висівним апаратом секції пневматичної сівалки точного висіву.

Мета роботи: підвищення якості висіву дражованого насіння цукрових буряків у дві стрічки з міжряддям 15 см пневматичним висівним апаратом шляхом їх розподілу дискретним повітряним потоком.

Поставлена мета може бути досягнута за умови реалізації наукової гіпотези, що полягає в тому, що розподільник потоку насіння цукрових буряків для пневматичного висівного апарата, який здійснює розподіл насіння повітряним потоком на дві стрічки, дасть змогу використовувати наявні в господарствах сівалки точного висіву для посіву насіння цукрових буряків стрічковим способом.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

- встановити можливість реалізації посіву насіння цукрових буряків за схемою міжрядь 45+15 см шляхом розподілу насіння на дві стрічки дискретним повітряним потоком;
- обґрунтувати параметри розподільника потоку насіння, що забезпечують якісний поділ і розподіл насіння у дві стрічки пневматичним висівним апаратом сівалки точного висіву;
- визначити раціональний режим роботи пневматичного висівного апарата для висіву дражованого насіння цукрових буряків у дві стрічки;
- довести доцільність використання розробленого розподільника потоку насіння для пневматичного висівного апарата сівалки точного висіву.

Об'єкт досліджень – розподільник для стрічкового висіву насіння цукрових буряків пневматичним висівним апаратом сівалки точного висіву.

Предмет досліджень – закономірності розподілу поданого насіння цукрових буряків на дві стрічки дискретним повітряним потоком.

Методи наукового дослідження. Лабораторний експеримент проведено з використанням апробованих методик; для його здійснення було модернізовано лабораторну установку для дослідження процесу висіву насіння пневматичним висівним апаратом. Вимірювання здійснювали сертифікованими та повіреними приладами. Під час виконання розрахунків і обробки результатів експерименту використовували сучасні комп'ютери та застосовували програмне забезпечення: Microsoft Excel, IPython, Mathcad, Maple, Statistica.

Перелік **публікацій** за темою роботи:

1. Сілецький Д., Андрійчук А., **Груницький М.**, Куликівський В. Властивості вологозахисних покриттів, які застосовуються в сільськогосподарському виробництві. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С.142-146.

2. Куликівський В.Л., Боровський В.М., Андрійчук А.В., **Груницький М.Р.** Аналіз насіннепроводів висівних апаратів пневматичних сівалок. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 106-110

3. Грудовий Р.С., Размахін Д.В., Сілецький Д.В., **Груницький М.Р.**, Шевчук О.А. Опис конструкції та принципу роботи сошника для внутрішньогрунтового розкидного посіву. Збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня

2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. URL : <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.

Практичну значущість мають: розроблений розподільник потоку насіння до висівного апарата сівалки точного висіву та обґрунтовані його раціональні параметри; рекомендації щодо застосування розподільника для стрічкового висіву насіння цукрових буряків пневматичним висівним апаратом сівалки точного висіву.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 29 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 55 сторінок комп'ютерного тексту, містить 30 рисунків та 5 таблиць.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ

1.1 Особливості вирощування цукрових буряків у насінництві

Строки посіву буряків залежать від біологічних особливостей культури та умов ґрунтового середовища. За даними роботи [6], насіння цієї культури починає проростати за температури 3...6 °С, а сходи рослин можуть витримувати морози до -3...-4 °С. Цукрові буряки переважно висівають пунктирним способом, тобто так, коли насіння в рядку розміщується по одному на заданій відстані одне від одного [6, 9]. Норма висіву становить близько 100 тис. насінин на гектар [7], що зумовлено потребою коренеплоду у великій площі живлення. Для зменшення ризику пошкодження насіння застосовують дражування [5], яке додатково захищає від ураження шкідниками та хворобами.

Цукрові буряки мають дворічний цикл вегетації, протягом якого обидва роки тісно пов'язані між собою. Коренеплоди другого року висловлюють певні вимоги до умов середовища та чутливо реагують на їх зміни. Вони ростуть 90...110 діб, їх коренева система менш розвинена і розташована у шарі ґрунту 0...60 см, що робить маточні коренеплоди більш вибагливими до додаткового зрошення [3]. Упродовж другого вегетаційного періоду проводять щонайменше три міжрядні обробітки разом із підживленням [9].

Строки збирання насінників цукрових буряків є змінними – їх коригують залежно від погодних умов, готовності техніки та сортових особливостей.

Передчасне збирання знижує посівні якості насіння, тоді як запізнення може призвести до його осипання. До збирання приступають тоді, коли плоди

насінників втрачають зелене забарвлення, а 30...40% клубочків набувають бурого кольору [4], при цьому консистенція насіння стає борошнистою [4]. Збирання здійснюють переобладнаними зернозбиральними комбайнами або вручну.

У сучасному насінництві цукрових буряків застосовують три основні способи вирощування насінників [6]:

- висадковий, коли використовують коренеплоди масою 300 г і більше, зберігаючи їх узимку в кагатах;
- безвисадковий, який передбачає літній посів насіння з густотою стояння 400...500 тис. рослин/га з їх зимівлею на полі;
- пересадковий, коли штеклінги (коренеплоди масою 50–200 г) викопують восени та закладають у коренесховище з подальшою весняною висадкою в ґрунт.

У разі застосування висадкового або пересадкового способу коренеплоди викопують навісними чи самохідними комбайнами [7, 8, 9] після встановлення стійкого похолодання, коли температура повітря опускається нижче 10 °С [2].

Викопані коренеплоди зберігають надземним, підземним або стаціонарним способом (спеціалізовані сховища чи підвали). Для успішного зберігання необхідно забезпечити оптимальні умови: температуру 2...3 °С, відносну вологість повітря близько 90 %, вміст CO₂ не більше 4...5 % та O₂ — у межах 12...15 %. У нашому регіоні найбільш поширеним є перший спосіб зберігання [6].

Після весняного підготовлення ґрунту [5, 10, 18] здійснюють висаджування маточників, які спочатку виймають із сховища, а потім на перебиральному столі видаляють загнилі залишки та некондиційні коренеплоди [14].

Висаджування маточників виконують механізованою садильною машиною. Під час посадки необхідно дотримуватися вертикального розташування в борозні, глибини загортання, оскільки над головкою

коренеплоду має бути щільно прилягаючий по всій поверхні ґрунт заввишки 2...2,5 см. Для денних потреб у висаджуванні маточники формують у бургт і вкривають землею [14].

Висаджувальний спосіб має ряд переваг:

- більша збереженість узимку;
- можливість сортування перспективних і неперспективних маточників перед висаджуванням.

Однак цей спосіб має й суттєві недоліки:

- висока трудомісткість і собівартість;
- витрати на збирання, очищення та транспортування [2, 9, 14];
- необхідність кагатування маточників і потреба вибраковування некондиційних коренеплодів перед посадкою;
- трудомісткий процес висаджування.

Як зазначають багато науковців, для тепліших кліматичних зон нашої країни підходить менш затратний безвисадковий спосіб вирощування маточників [7, 11]. Проте його реалізація в Україні регіоні є важкодосяжною, оскільки виникають значні ризики, пов'язані з морозами та сніговим покривом, від яких залежить виживання коренеплодів.

З урахуванням кліматичних умов метод вирощування штеклінгів, тобто коренеплодів масою близько 150 г, є найбільш перспективним і придатним [11]. Його концепція полягає в тому, що маточники невеликих розмірів вирощують за більш загущеної посадки. Це дозволяє отримати коренеплоди невеликих розмірів із високим виходом насіння, оскільки насіннева продуктивність маточників зростає зі зменшенням їх маси [1, 9].

За результатами досліджень було встановлено, що маса штеклінга повинна знаходитися в межах 100...300 г [1]. За маси маточника менше ніж 100 г вихід насіння різко знижувався.

З урахуванням найвищої продуктивності штеклінгів за умови їх висаджування у кількості, тотожній масі великих маточників, можливе

підвищення валового збору насіння, що дозволить компенсувати додаткові витрати.

У ІМЕСГ була запропонована технологія вирощування маточників за допомогою стрічкового висіву [12], при якому два рядки з відстанню між ними 15 см чергуються з ширшими міжряддями 45 см для проходу тракторного агрегату [6]. На думку проф. В.В. Василенка [7], до висіву насіння цукрових буряків висуваються такі вимоги:

- поштучний відбір насіння з бункера [6] або камери забору сівалки;
- скид насіння в борозну через рівні проміжки часу та з мінімальної висоти;
- забезпечення вертикальної траєкторії падіння;
- мінімізація пошкодження посівного матеріалу.

Посів насіння цукрових буряків на початку ХХ ст. здійснювали горизонтально-дисковими апаратами, які задовільно виконували лише поштучний відбір. Зважаючи на низьку схожість, норма висіву для цукрових буряків була свідомо завищеною, а остаточне формування густоти насадження (5...6 рівновіддалених рослин на одному метрі) проводили вручну. Підприємства намагалися створити механізовані проріджувачі рослин, однак через складність їх експлуатації масового застосування вони не отримали [2, 5].

Невдовзі селекціонерами було виведено сорти з одноростковим насінням та високим відсотком (до 96%) схожості. Тому горизонтально-дискові апарати були замінені вертикально-дисковими [7]. Найвідоміший з них установлений на сівалці ССТ-12. Цей висівний апарат зазнав численних модернізацій, частину з яких навіть не було впроваджено, однак він має низку недоліків:

- підвищена металоємність конструкції;
- висока пошкоджуваність насіння;
- висівний диск має мати певний розмір комірок для кожної фракції навіть однієї культури.

Попри наявні недоліки науковці продовжують удосконалювати цей висівний апарат, зокрема й для використання у насінництві цукрових буряків [7].

У країнах Західної Європи та Америки на початку ХХ ст. проводили дослідження щодо застосування пневматики на сівалках точного висіву.

Висівні апарати були вертикально-дисковими з підведенням розрідження [3, 7, 10, 12]. Їх використання вважалося перспективним рішенням завдяки ряду переваг:

- низька пошкоджуваність посівного матеріалу;
- відсутність потреби у ретельному калібруванні насіння;
- універсальність, тобто можливість висіву більшості технічних просапних культур за умови простої заміни диска у висівному апараті;
- дотримання вимог до якості посіву.

Однак висівний апарат має і свої недоліки:

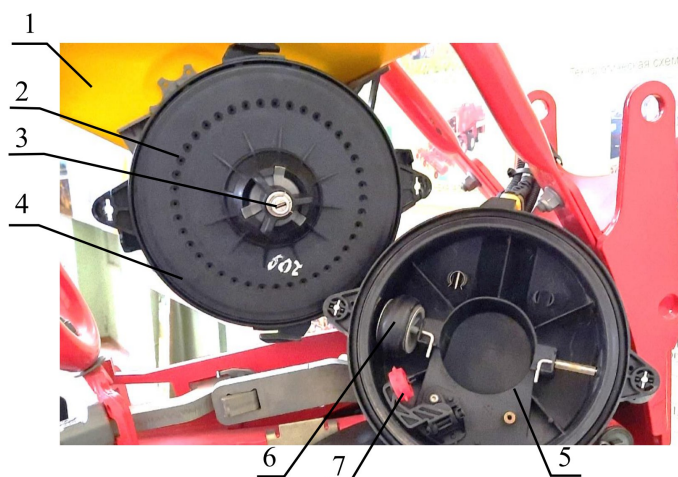
- ускладнення конструкції через використання патрубків і вентилятора, що приводиться від ВВП;
- чутливість процесу присмоктування насіння до нестабільності створеного розрідження;
- підвищене енергоспоживання корисної потужності тягового засобу;
- додатковий шум від вентилятора.

З огляду на зазначені переваги сучасні моделі сівалок точного висіву з пневмовакуумними висівними апаратами відіграють ключову роль у забезпеченні точності посіву. Розглянемо роботу висівного апарата, що працює за рахунок надлишкового тиску, сівалки Tempo Vaderstad [6] (рис. 1.1).

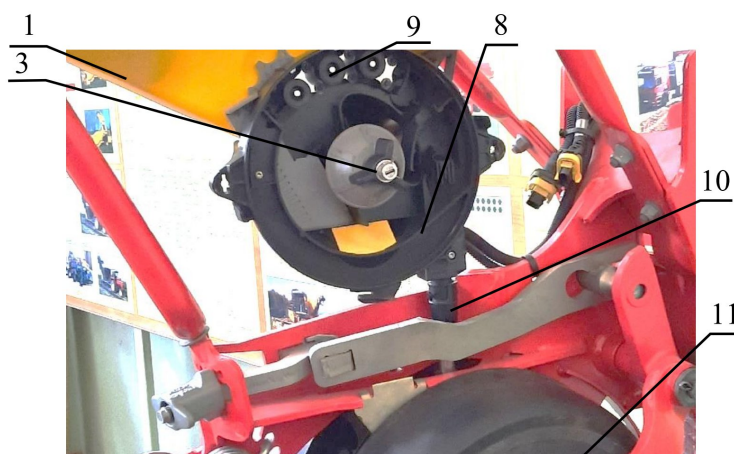
Робота висівного апарата відбувається таким чином. Насіння з бункера 1 самопливом надходить до попередньої камери 8, де за допомогою вентилятора створюється надлишковий тиск, який переміщує їх до отворів 4 диска 2, де насіння утримується за рахунок стаціонарного повітряного потоку в камері. Для забезпечення максимальної герметичності диска відносно камери на кришці

висівного апарата 5 встановлено ущільнювальні котки 6, які притискають диск до камери надлишкового тиску.

Висівний апарат працює від електродвигуна, на валу якого закріплений швидкознімний механізм 3, що дозволяє змінювати диски протягом однієї-двох хвилин із урахуванням зняття та встановлення кришки. Електропривід сівалки забезпечує плавне, безступеневе регулювання норми висіву, а слизький ґрунт не впливає на роботу агрегату. У цьому випадку частота обертання вала електродвигуна синхронізується зі швидкістю машинно-тракторного агрегату, яку зчитує радар на основі ефекту Доплера.



а) висівний апарат сівалки



б) висівна секція сівалки

Рис. 1.1. Будова посівної секції сівалки Tempo Vaderstad: 1 – бункер; 2 – висівний диск; 3 – привід диска з механізмом кріплення; 4 – отвір диска; 5 – кришка висівного апарата; 6 – притискний коток; 7 – голчастий коток; 8 –

пневматична камера; 9 – відсікач зайвого насіння; 10 – насінненаправник; 11 – прикочувальний коток.

Скидання насіння здійснюється за допомогою голчастого котка 7, який відриває частинку від отвору диска 4, у результаті чого вона захоплюється надлишковим тиском і переміщується у насінненаправник 10, а далі — у дисковий сошник. Зайві насінини відділяються від диска за допомогою відсікача 9.

Представлений апарат також має недоліки:

високі вимоги до герметичності з'єднань висівного апарата;

наявність системи «електродвигун – висівний апарат» висуває високі вимоги до їх синхронної роботи;

підвищена чутливість до зовнішніх умов [6, 7] через складність конструкції висівного апарата і системи керування.

Будову пневмовакуумного висівного апарата можна розглянути на прикладі сівалки (рис. 1.2).

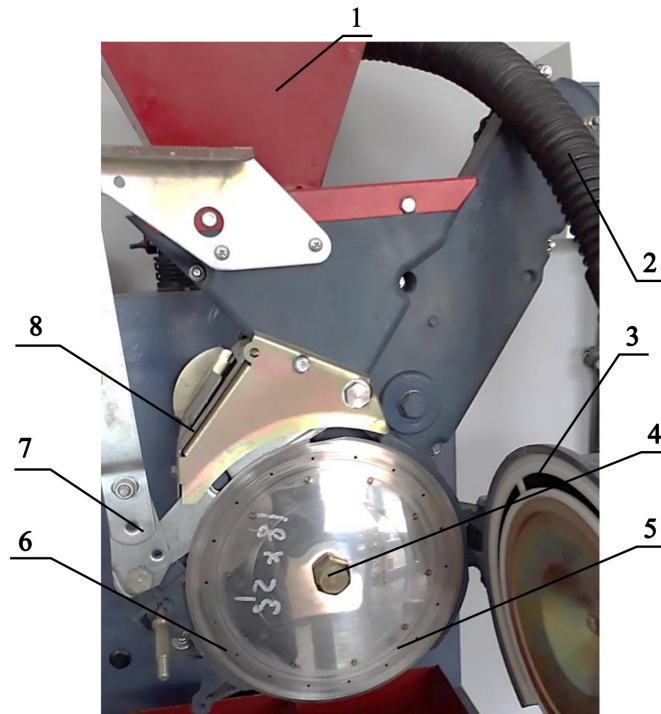


Рис. 1.2. Будова висівного апарата сівалки: 1 – бункер; 2 – патрубок розрідження; 3 – вакуумна камера; 4 – вал приводу сівалки; 5 – висівний диск; 6

– отвір висівного диска; 7 – важіль регулятора відсікача зайвого насіння; 8 – оглядове вікно.

У вакуумній камері 3 висівного апарата (рис. 1.2) через патрубки 2 вентилятором створюється розрідження. Завдяки ущільнювачам у камері вакуум наближений до стаціонарного та має високий ККД. Насінневий матеріал із бункера самопливом надходить у попередню камеру, звідки присмоктується до отворів 6 висівного диска 5. Рівень заповнення камери можна перевірити через оглядове вікно 8. Після повного оберту диска насінини з отворів падають у борозну.

Для запобігання присмоктуванню до отвору більше ніж одного насіння використовують скидач спеціальної конструкції (не показаний), який за умови правильної настройки забезпечує точний розподіл посівного матеріалу в борозні [6, 7].

Таким чином, висівні апарати надлишкового тиску мають недоліки, пов'язані з високою складністю виготовлення, експлуатації та вимогами до герметичності з'єднань. Для вакуумних висівних апаратів характерна відносно низька швидкість виходу насіння в сошник і борозенку, що визначається частотою обертання диска. У зв'язку з цим збільшується коефіцієнт варіації розподілу інтервалів.

Попри це, такі апарати вирізняються простотою конструкції та є найпоширенішими на сучасних сівалках точного висіву, тому вони можуть бути використані у наших дослідженнях.

1.2 Можливість використання існуючих машин і розробок у виробництві штеклінгів

Однією з проблем упровадження схеми міжрядь 45+15 см (рис. 1.3) є відсутність комплексу машин для вирощування цукрових буряків. Проте дослідження в цьому напрямі проводяться, і як приклад вітчизняної розробки

можна навести модель сівалки ННЦ ІМЕСГ на базі сівалки ССТ-12Б (рисунок 1.4). У висівному апараті встановлено два диски з кутовим зміщенням на одній висівній секції, що забезпечує висів насіння у два суміжні рядки в шаховому порядку [8].

Відомий пристрій [4], що являє собою розділювач потоку насіння з одного висівного апарата сівалки ССТ-12Б на два рядки (рис. 1.5–1.6). Конструкція являє собою трійник, який складається з вхідного відводу з перегородкою 2 та двох косих відводів 1 у вигляді трубки прямокутного перерізу. Встановлюється безпосередньо після висівного диска сівалки.

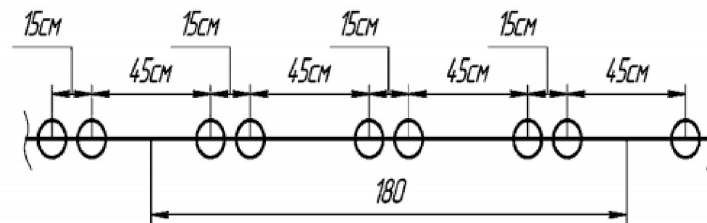


Рис. 1.3. Схема міжрядь 45+15 см.



Рис. 1.4. Модернізована сівалка на базі ССТ-12Б: 1 – бункер; 2 – поєднані висівні апарати; 3 – прикочувальний коток; 4 – загортач; 5 – рама та навісний пристрій трактора.

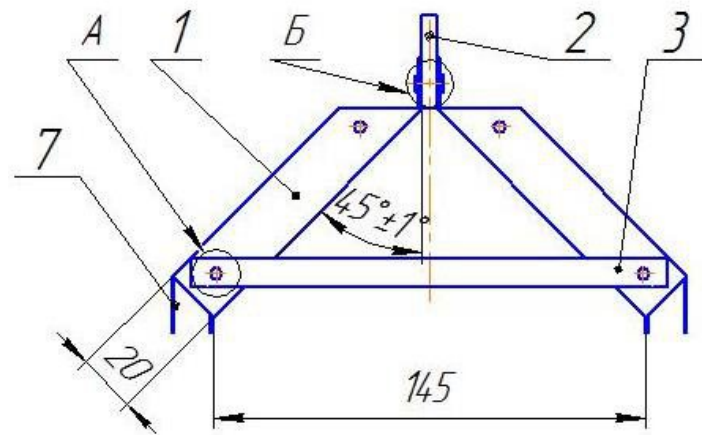


Рис. 1.5. Розділювач потоку для сівалки ССТ-12Б: 1 – трубка прямокутного перерізу; 2 – перегородка; 3 – підсилювальна пластина; 7 – напрямні пластини.

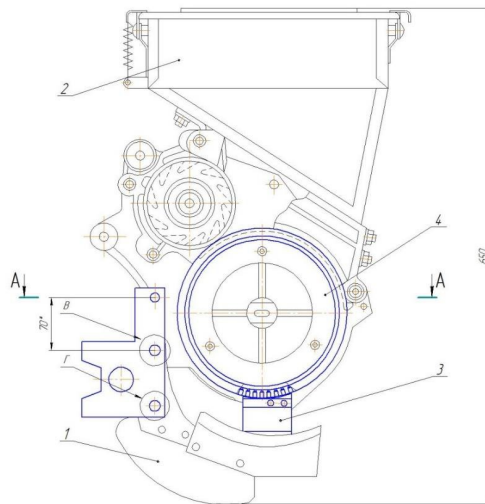


Рис. 1.6. Місце встановлення розділювача на сівалці: 1 – сошник сівалки; 2 – бункер; 3 – розділювач потоку; 4 – дворядковий висівний диск.

Для роботи розділювача необхідно, щоб на сівалці був установлений дворядковий висівний диск. Принцип роботи пристрою полягає в тому, що насіння з лівого ряду диска падає у лівий косий відвід і далі до лівого сошника, а з правого — у відповідний відвід і до правого сошника.

Також нами пропонується пневматичний апарат для дворядкового висіву [6] насіння просапних культур із пластинчастими направлячами (рис. 1.7).

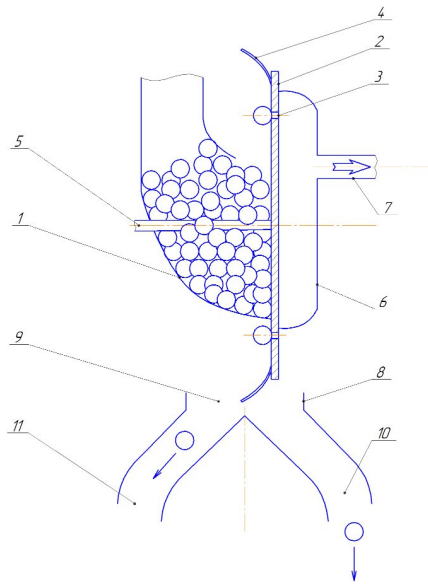


Рис. 1.7. Пневматичний апарат для дворядкового висіву: 1 – камера заповнення; 2 – висівний диск; 3 – отвори комірок диска; 4 – пластинчастий направляч; 5 – приводний вал диска; 6 – вакуумна камера; 7 – патрубок; 8 – вхідний відвід; 9 – вхідний канал; 10 і 11 – вихідні канали.

Пневматичний апарат для дворядкового висіву (рис. 1.8) просапних культур включає камеру заповнення 1, у яку надходить насіння з бункера (не показаний), вертикально розташований висівний диск 2 із наскрізними непрохідними комірками 3, пластинчастими направлячами 4 (рис. 1.9) і приводним валом 5, вакуумну камеру 6 з патрубком 7 та розділювач 8 із вхідним каналом 9 і двома вихідними каналами 10 і 11.

Направлячі 4 розміщені на кожній другій комірці по колу з більшим радіусом, ніж радіус кола розташування комірок. Розділювач 8 установлений асиметрично відносно робочої площини висівного диска, що прилягає до камери заповнення таким чином, що ця площа збігається з одним із двох вихідних каналів розділювача.

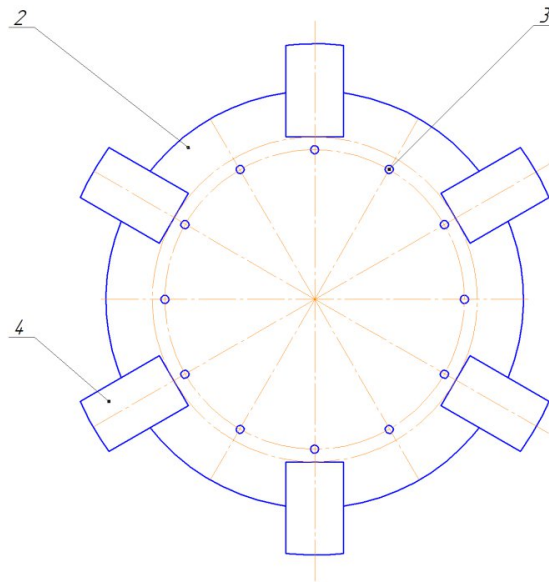


Рис. 1.8. Висівний диск пневматичного апарата: 2 – диск для висіву насіння; 3 – отвір на висівному диску; 4 – пластинчастий елемент-направляч.

Пневматичний апарат для дворядкового висіву просапних культур працює таким чином. Насіннєвий матеріал, що перебуває в камері заповнення, контактує з обертовим висівним диском 2, присмоктується до отворів диска 3 завдяки створеному розрідженню і виноситься з камери заповнення. У нижній точці траєкторії обертання висівного диска отвори виходять із зони дії вакуумної камери 6, і насіння падає вниз у напрямку до сошника. Спочатку воно потрапляє у вхідний канал 9 розділювача 8.

Отвори 3, біля яких немає направляча 4, скидають насіння безпосередньо у вихідний канал 10. Якщо біля отвору розміщений направляч, то частинка зміщується у поперечному напрямку й потрапляє у вихідний канал 11. Таким чином, насіння залишає висівний апарат двома потоками, які у ґрунті формують дві стрічки з шаховим розміщенням. Відстань між стрічками дорівнює відстані між вихідними каналами розділювача.

Запропоновані пристрої забезпечують дворядковий висів просапних культур за допомогою однорядкової висівної секції сівалки точного висіву, у результаті чого збільшується площа живлення рослин.

Зарубіжні колеги з компанії Lemken ще у 2019 році презентували серійний зразок сівалки Azurit 9/8.75 KD (рис. 1.9) [13], яка відрізняється не лише

використанням центрального 600-літрового насінневого бункера на всі висівні секції, але й реалізацією технології DeltaRow.

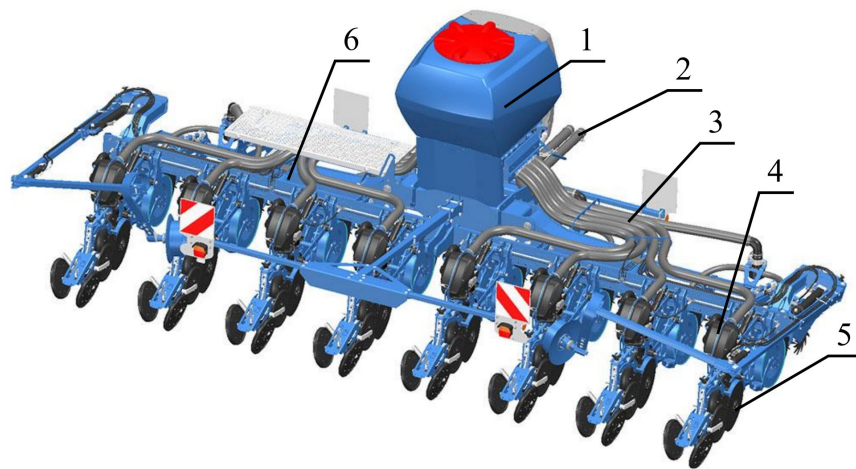


Рис. 1.9. Сівалка Azurit 9/8.75 KD від Lemken: 1 – центральний бункер; 2 – магістраль нагнітання повітря; 3 – трубопроводи подачі насіння до висівних апаратів; 4 – висівний апарат; 5 – дискові сошники піврядків DeltaRow; 6 – рама.

За даними виробника, основою конструкції є висів насіння технічних культур у ряд, що складається з двох піврядків, розташованих на відстані 12,5 см один від одного, між якими вноситься мінеральне добриво. Схему розміщення рослин за такого способу висіву показано на рисунку 1.10, де видно, що зона живлення рослин, позначена великим синім колом, завдяки шаховому розташуванню збільшується порівняно з класичною схемою до 70% [3, 4], що опосередковано впливає і на прогнозовану врожайність рослин.

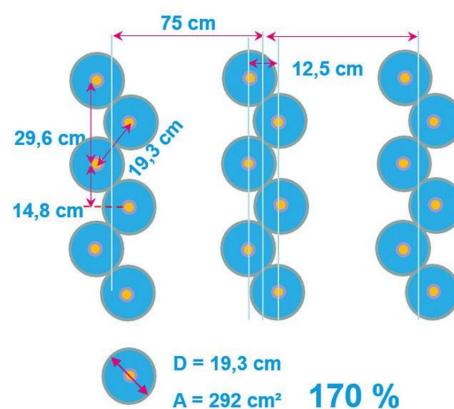


Рис. 1.10. Технологія DeltaRow.

Для догляду за посівами можливе використання причіпних або самохідних обприскувачів [4]. Як альтернативу колектив авторів [7] пропонує агрегат, який уносить гербіциди та інші хімікати в захисну зону рядка без безпосереднього контакту з гичкою коренеплоду [1] (рис. 1.11). Машина складається з піднімача листків 2, захисного щитка 3, який запобігає потраплянню крапель робочого розчину на листя гички цукрових буряків 1. Під щитками розташовано дві щільні форсунки 4, які вносять препарат безпосередньо в захисну зону рядка [7].

Ключовою операцією у вирощуванні цукрових буряків є збирання, адже своєчасно та повністю зібраний урожай маточників є завершальним штрихом усієї діяльності за перший рік вегетації цукрових буряків. Оскільки міжряддя 45+15 см є нестандартним для серійних збиральних машин, нами пропонується використання комбайнів для збирання моркви, оскільки форма та розміри штеклінгів і моркви є подібними.

Для збирання моркви використовують машини підкопувального та теребильного типу. Докладніше ці машини описані в роботах [9], тому не будемо зосереджувати на них увагу. Розглянемо лише принцип роботи сучасних теребильних комбайнів (рис. 1.12).

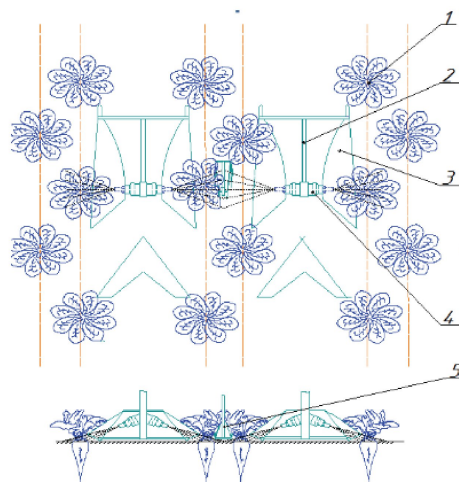


Рис. 1.11. Машина для догляду за посівами за схемою 45+15 см: 1 – цукрові буряки; 2 – піднімач листків; 3 – захисні щитки; 4 – розпилювальний пристрій; 5 – міжрядні піднімачі листків.

Машина працює таким чином: підкопувальний пристрій 3 (рис. 1.12) заглиблюється у ґрунт і розпушує його поблизу коренеплодів. Ботвопідіймач 4 піднімає листя з поверхні землі та подає його до терebильної секції 5, яка висмикує рослини з ґрунту та здійснює їх первинне очищення. Далі роторний пристрій для видалення гички відрізає листову частину, а коренеплід транспортується конвеєрами 7 і 8 безпосередньо у бункер 9. Гичка з терebильної секції падає на поверхню поля позаду комбайна.

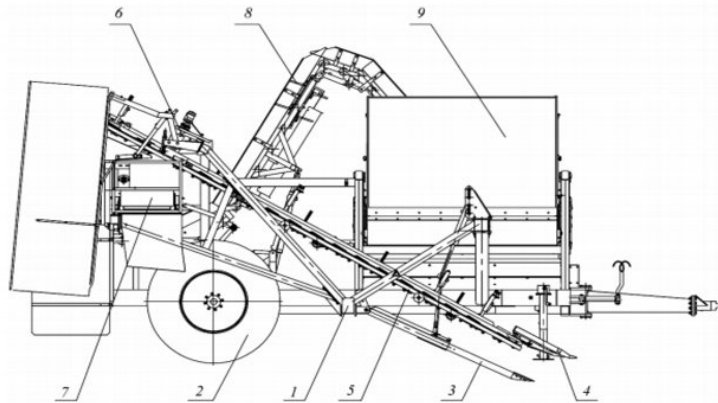


Рис. 1.12. Комбайн терebильного типу: 1 – рама; 2 – колісний хід; 3 – підкопувальний пристрій; 4 – ботвопідіймач; 5 – терebильна секція; 6 – роторний пристрій для видалення гички; 7 – поперечний конвеєр; 8 – вивантажувальний конвеєр; 9 – бункер із рухомим днищем.

На підставі викладеного можна зробити висновок, що в контексті розвитку насінництва цукрових буряків доцільно розпочати з використання доступних на ринку машин, здатних працювати за схемою розміщення міжрядь 45+15 см, зокрема тих, що описані в цьому розділі.

Висновки по розділу

Для збільшення площі живлення рослин з метою підвищення урожайності коренеплодів слід дослідити схему розміщення міжрядь 45+15 см із розташуванням насіння у стрічці в шаховому порядку.

Розроблення технічного рішення для переобладнання висівних апаратів універсальних сівалок точного висіву дасть змогу підтвердити ефективність вирощування штеклінгів із використанням схеми розміщення міжрядь 45+15 см.

РОЗДІЛ 2

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РОЗДІЛЮВАЧА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Обґрунтування параметрів розділювача для дворядкового висіву

Для реалізації стрічкового висіву насіння цукрових буряків розглядалися кілька можливих шляхів:

- установлення додаткових висівних апаратів;
- зміна конструкції наявних висівних апаратів;

- розроблення розділювача для висівного апарата.

Ширина посівних секцій існуючих пневматичних висівних апаратів не дозволяє розмістити їх на одному брусі рами, що потребуватиме зміни конструкції всієї сівалки. Питання зміни конструктивних параметрів наявних висівних апаратів досліджувалося в роботі [5]. Однак через труднощі, пов'язані з виготовленням висівного апарата, подальші дослідження не проводилися. Ця робота присвячена обґрунтуванню параметрів і режиму роботи розділювача потоку насіння для існуючих серійних висівних апаратів.

Пристрій для розподілу насіння на виході з висівного апарата та їх стрічкового висіву за схемою 45+15 см розроблено на кафедрі агроінженерії та технічного сервісу Поліського національного університету (рис. 2.1).

Розділювач потоку виконано у вигляді трійника, що складається з вертикального вхідного відводу 3 (рис. 2.1), виготовленого у формі прямокутного паралелепіпеда, та двох відвідних косих відводів 5 і 6, виконаних у формі трапецієподібної призми. У вертикальному вхідному відводі розташована повітряна камера 4 із встановленою форсункою інжекторної пневмосистеми, яка забезпечує дискретну подачу повітря з частотою, що дорівнює половині частоти сходу насіння з висівного диска.

Робота запропонованого пристрою відбувається таким чином: посівний матеріал із висівного диска 1 надходить у вертикальний вхідний відвід 3 розділювача потоку й за відсутності подачі повітря в повітряну камеру 4 потрапляє на початок косого відводу 5 з боку розміщення форсунки, після чого – у посівне ложе, сформоване першим сошником. При подачі повітря до форсунки насіння зміщується повітряним струменем у поперечному напрямку та потрапляє на початок косого відводу 6, з протилежного від форсунки боку, а потім — у борозну, створену другим сошником [3].

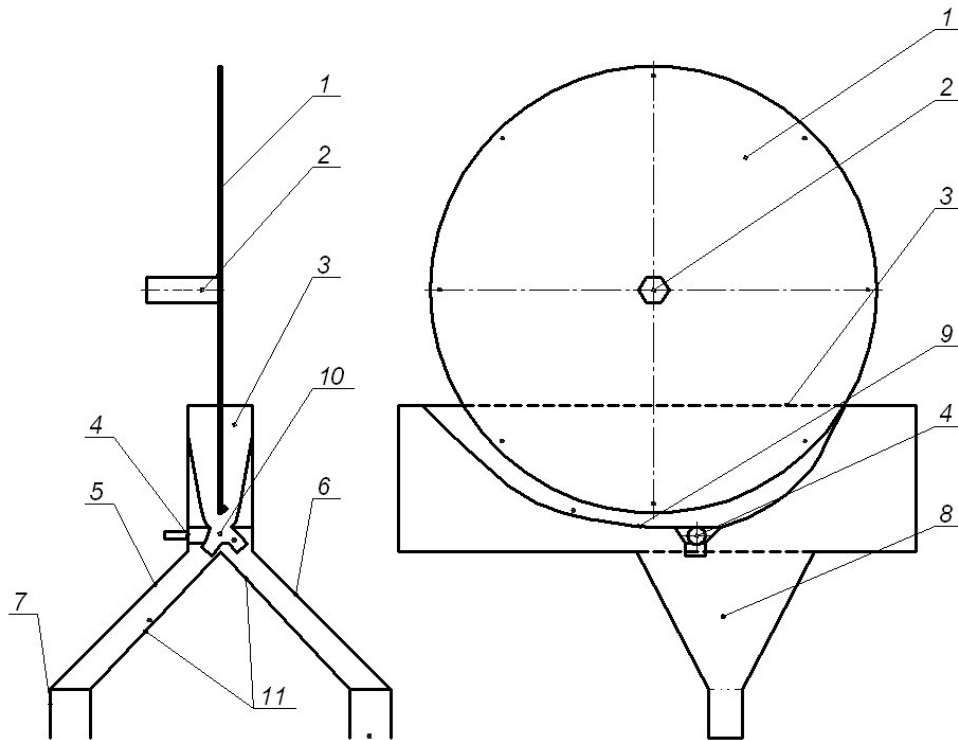


Рис. 2.1. Схема будови розділювача потоку насіння з висівного апарата сівалки точного висіву: 1 – висівний диск; 2 – вал приводу диска; 3 – вертикальний вхідний відвід; 4 – форсунка подачі повітря; 5 і 6 – зовнішні стінки вихідного відводу; 7 – напрямні для насіння; 8 – насіння цукрових буряків; 9 – похилий лоток для подачі насіння до повітряної камери; 10 – повітряна камера; 11 – внутрішня стінка відводу.

Для визначення умов присмоктування насіння до отворів диска та траєкторії руху насіння від диска до виходу з розділювача під час дворядкового висіву необхідно розробити математичні моделі.

2.2 Опис лабораторних установок для проведення досліджень

Експериментальні дослідження були проведені на лабораторній установці (рис. 2.2) у лабораторії кафедри сільськогосподарських машин, тракторів і автомобілів [4, 10].

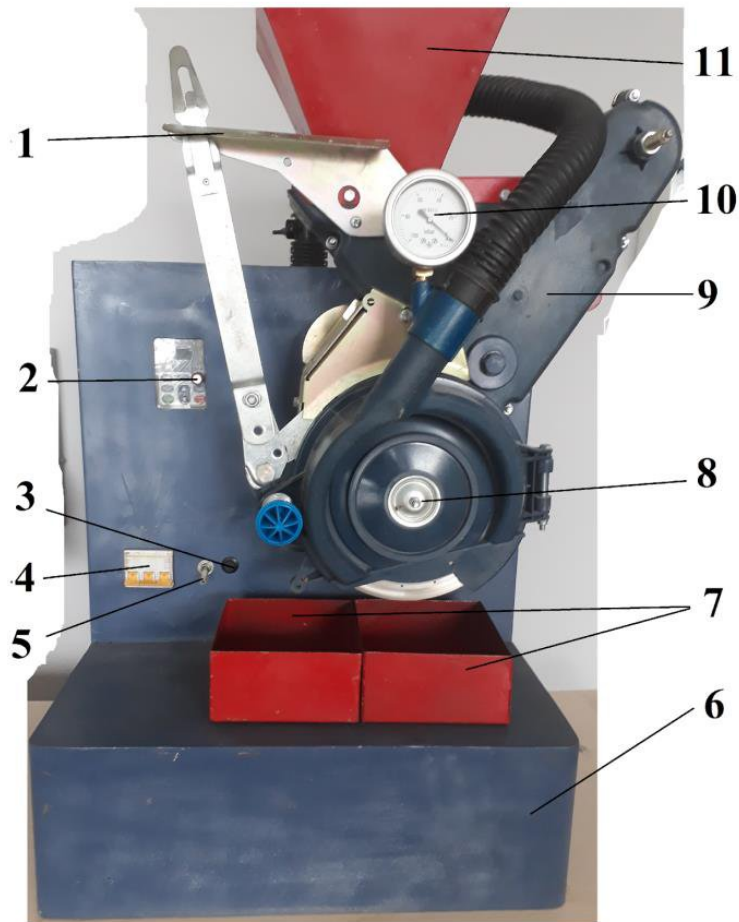


Рис. 2.2. Лабораторна установка для вивчення процесу висіву насіння цукрових буряків: 1 – скидач висіваного насіння; 2 – регулятор частоти обертання; 3 – регулятор рівня розрідження в камері; 4 – джерело живлення; 5 – вимикач живлення вентилятора; 6 – корпус; 7 – ємність для збору висіяного насіння; 8 – висівний апарат; 9 – привід висівного апарата; 10 – вакуумметр; 11 – бункер для насіння.

Лабораторна установка складається з висівного апарата сівалки ТС-М-4150А [1], до якого під'єднано вакуумний насос для створення регульованого розрідження. Вал висівного апарата з диском приводиться в рух електродвигуном із можливістю безступеневого регулювання частоти обертання [6, 13]. Додатково установка обладнана ємностями для збору насіння, висіяного висівним апаратом.

Лабораторна установка для визначення швидкості вітання дражованого насіння цукрових буряків та коефіцієнта парусності [3, 11], подана на рис. 3.2.

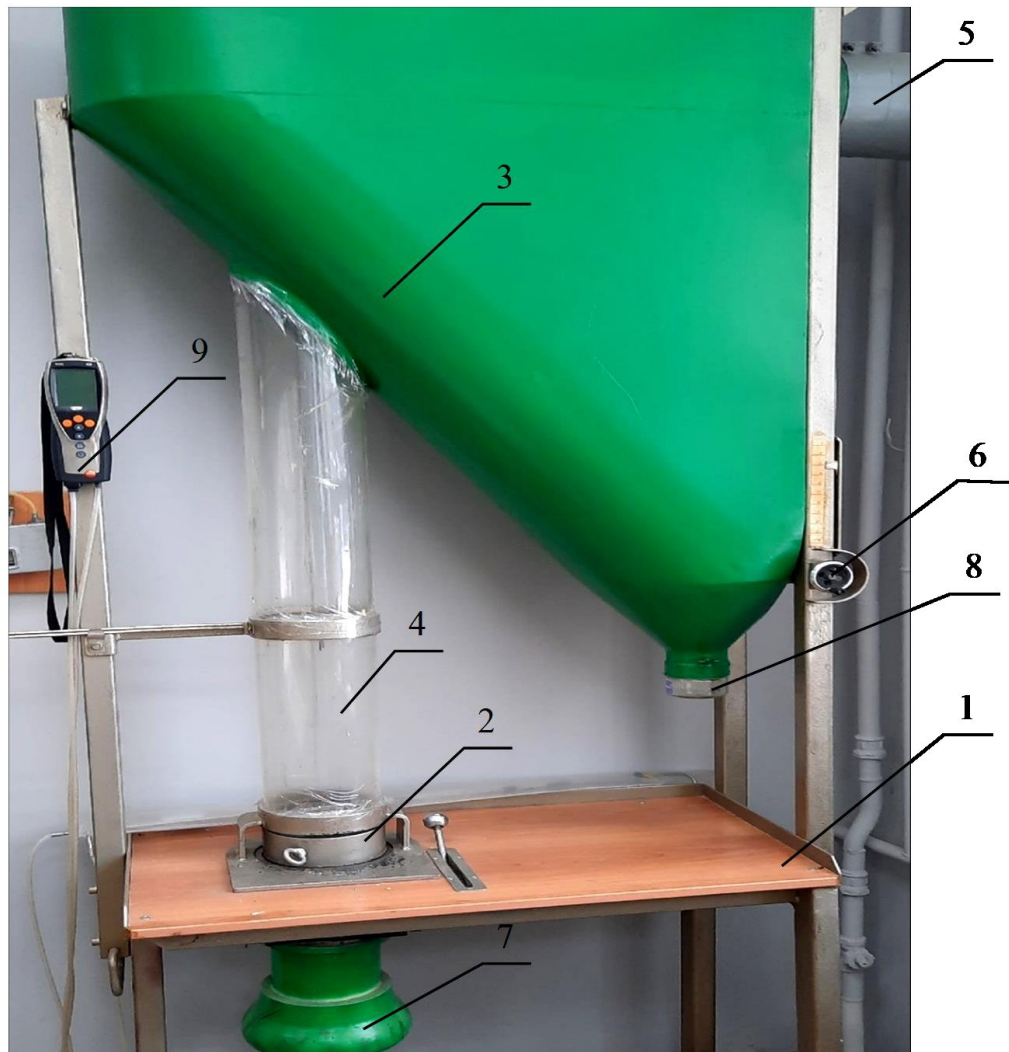


Рис. 2.3. Установка для визначення швидкості вітання насіння: 1 – робочий стіл, 2 – обичайка, 3 – циклон, 4 – аеродинамічна труба, 5 – трубопровід вентилятора, 6 – регулятор положення заслінки, 7 – повітрязабірник, 8 – відстійник для насіння, 9 – багатофункційний прилад Testo 435-3 із трубкою Піто-Прандтля.

На дротяну сітку обичайки 2 (рис. 2.3), розташовану для зручності на робочому столі 1, висипається порція насіння. Вентилятор, що працює від електродвигуна, створює в циклоні 3 та аеродинамічній трубці 4 розрідження, яке змінюється за допомогою заслінки, що регулюється рукояткою 6. Створюваний перепад тисків в установці забезпечує рух повітряного потоку до вентилятора з повітрязабірника 7 крізь шар насіння, розташований на дротяній сітці обичайки 2, у результаті чого насіння переходить у зважений стан і починає вітати. Насіння, швидкість вітання яких менша за швидкість повітря, встановлену в

аеродинамічній трубі 4, виноситься в циклон 3, де швидкість повітряного потоку зменшується в кілька разів і стає нижчою за швидкість вітання насіння, після чого воно потрапляє в відстійник 8. Швидкість повітряного потоку контролюється за допомогою багатофункціонального вимірювального приладу Testo 435-3 (поз. 9) зі вбудованим датчиком вимірювання диференціального тиску та трубкою Піто-Прандтля.

Окремо виготовлена повітряна розподільча камера складається зі вхідного каналу 2 (рис. 2.4), двох вихідних каналів 3 і 4 та форсунки пневмосистеми 5. До форсунки пневмосистеми 5 через електромагнітний клапан 8 під'єднувався компресор 7 із ресивером 6. Електромагнітний клапан 8 керувався блоком керування 9 з джерелом живлення 10. Момент спрацювання клапана 8 встановлювався мікроконтролером фірми Atmel, пов'язаним із датчиком Холла, який спрацьовував під час проходження отворів висівного диска. При кожному парному отворі вмикався електромагнітний клапан 8 подачі повітря від компресора 7 із ресивером 6 до форсунки 5, унаслідок чого насіння, що потрапляє у вхідний відвід розподільника 2, переміщується в канал зі зміщенням 3, а за відсутності подачі — у вихідний канал без зміщення 4.

Для визначення працездатності повітряної камери розподільника під кожний відвід встановлювали лотки для збору насіння. Лабораторну установку вмикали на певний проміжок часу, після чого проводили підрахунок кількості насіння в кожному лотку.

Після перевірки працездатності повітряна камера встановлювалася в корпус розподільника потоку (рис. 3.4) асиметрично, зі зміщенням вправо відносно його осі [3]. Розподільник складається з вертикального вхідного відводу 1, що повторює форму сошника сівалки, і двох відвідних похилих відводів 2 і 3, які спрямовують насіння у лівий і правий сошники (у нашому випадку — у лотки для збору насіння 5 і 6). Розподільник виготовлений з можливістю встановлення на секцію сівалки ТС-М-4150А замість серійного сошника за допомогою проушин 10.

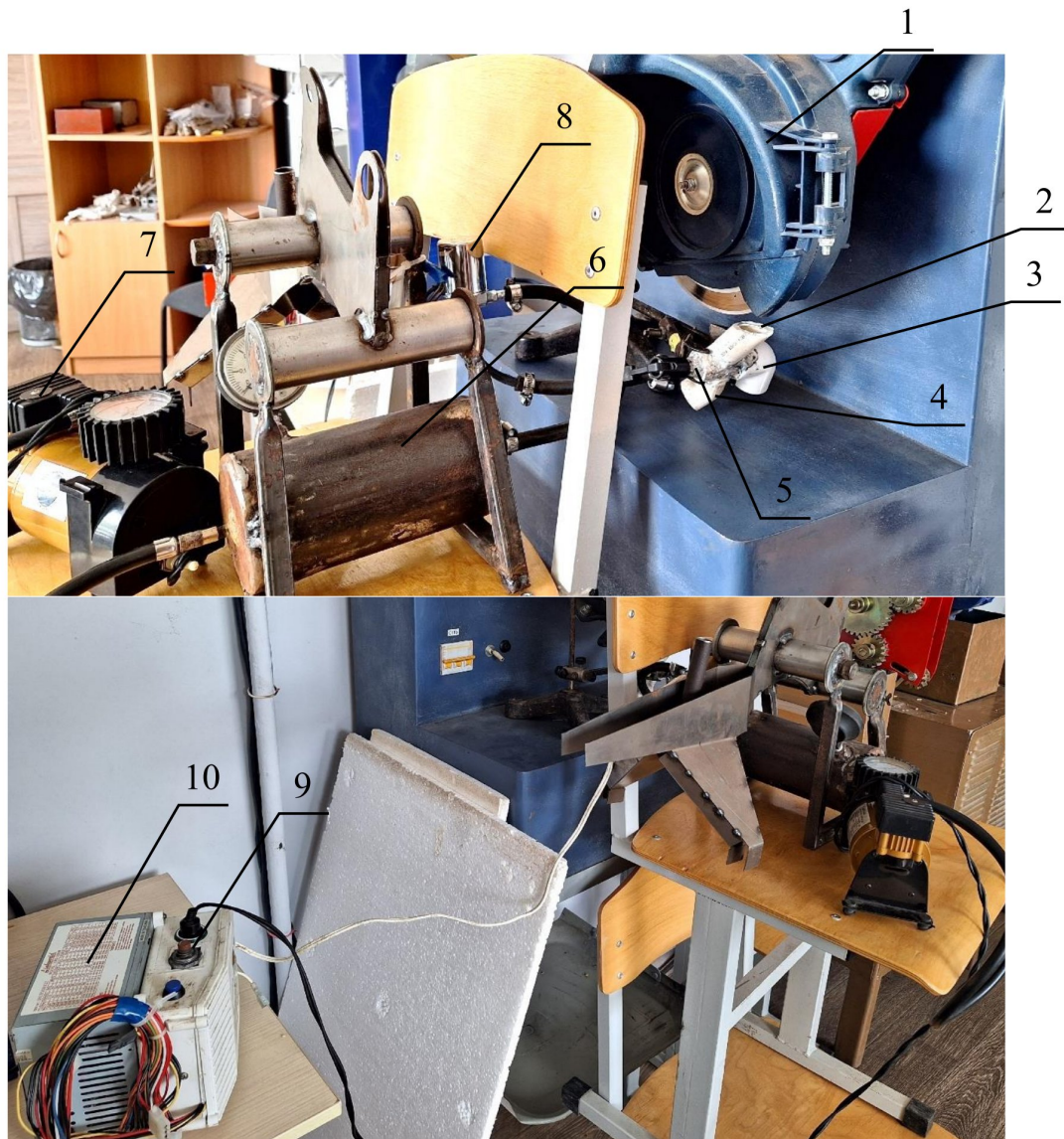


Рис. 2.4. Лабораторна установка для випробування механізму повітряної камери розподільника потоку: 1 – висівний апарат, 2 – вхідний канал розподільника потоку, 3 – вихідний канал розподільника зі зміщенням, 4 – вихідний канал розподільника без зміщення, 5 – форсунка пневмосистеми, 6 – проміжний ресивер, 7 – компресор, 8 – електромагнітний клапан, 9 – блок керування розподільником, 10 – блок живлення розподільника на 12 В.

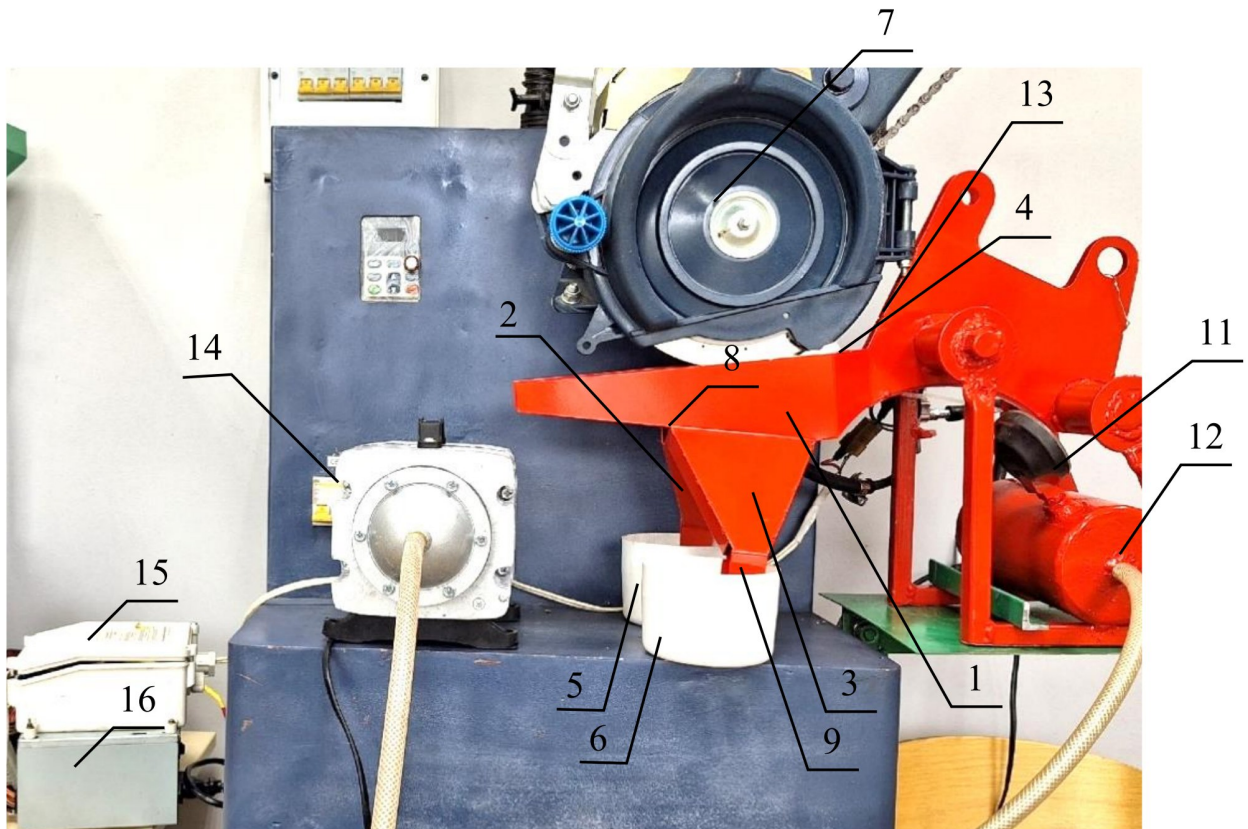


Рис. 2.5. Лабораторна установка для випробування розподільника потоку насіння до висівного апарата: 1 – вхідний відвід, 2 і 3 – похилі вихідні відводи, 4 – нахилений лоток для спрямування насіння до повітряної камери, 5 і 6 – лотки для збору насіння, що спрямовується до сошників, 7 – висівний апарат, 8 – форсунка пневмосистеми, 9 – напрямні для насіння, 10 – проушина для кріплення до сівалки, 11 – манометр пневмосистеми, 12 – ресивер, 13 – електромагнітний клапан, 14 – компресор, 15 – блок керування, 16 – блок живлення.

Лабораторна установка працює таким чином: насіння з висівного апарата 7 потрапляє в лоток 4, з якого воно скочується в повітряну камеру, де за відсутності подачі повітря не змінює свого напрямку руху й потрапляє у лівий вихідний відвід. При ввімкненні подачі повітря насіння, що потрапило в повітряну камеру, під дією повітряного потоку змінює траєкторію руху й потрапляє в правий вихідний відвід. На виході з розгалужень розподільника встановлені напрямні 9 для коригування траєкторії руху насінневого матеріалу перед надходженням у сошник.

Керувальний механізм розподільника забезпечує періодичність спрацювання форсунки, що дорівнює половині частоти сходу насіння з висівного диска. Він складається з блока живлення 16 і блока керування 15, а також ноутбука 17 для програмування контролера у блоці керування. У зібраному вигляді керувальний елемент розподільника подано на рис. 2.6.

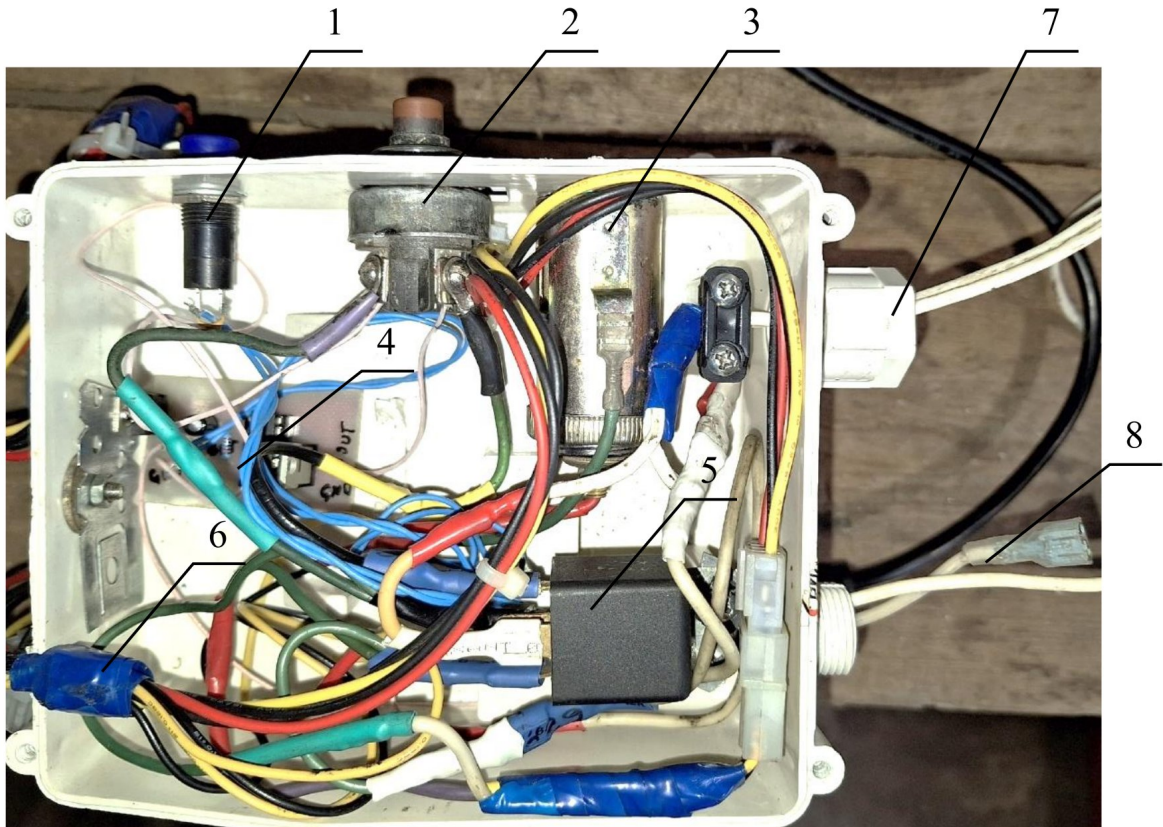


Рис. 2.6. Блок керування розподільником: 1 – кнопка імітації роботи датчика-лічильника насіння, 2 – кнопка ручного керування мікроконтролером, 3 – силова розетка для компресора 12 В, 4 – плата з мікроконтролером, 5 – реле керування електромагнітним клапаном подачі повітря, 6 – проводи джерела струму, 7 – проводи від реле до клапана, 8 – проводи до датчика.

Працює він таким чином: струм подається до реле 5, кнопки 2 та мікроконтролера 4. За відсутності подачі струму на керувальні контакти реле 5 електромагнітний клапан подачі повітря (не показаний) відкривається. Періодичність його спрацювання задається мікроконтролером, який отримує сигнал від датчика Холла 8.

2.3 Методика експериментальних досліджень

Аналіз розмірних характеристик дражованого насіння сферичної форми включав вимірювання таких показників, як діаметр, маса, об'єм, густина, а також їх обробку за допомогою статистичних методів.

Діаметр насіння вимірювали за допомогою механічного мікрометра в лабораторії кафедри сільськогосподарських машин, тракторів і автомобілів.

Досліджуване насіння пропускали через класифікатор із діаметрами отворів решіт 6; 5; 4,5; 4; 3; 2 мм. Порцію насіння, що не пройшла крізь решето, висипали в окрему ємність, з якої відбирали 50 випадкових насінин та вимірювали їхній діаметр за допомогою мікрометра (точність $\pm 0,05$ мм). Результати вимірювань заносили до лабораторного журналу.

До таблиці також вносили інформацію про масу порції вимірюваного насіння, яку визначали за допомогою лабораторних ваг (точність $\pm 0,05$ г).

Цей показник використовувався для встановлення фізико-механічних характеристик насінневого матеріалу. Тим самим приладом вимірювали і повну масу насіння, що залишилося на решеті, після чого результати записували до таблиці.

Показники діаметра насіння порівнювали з вимогами ДСТУ, які для представленого матеріалу мають бути в межах 3,5–4,75 мм [7].

Для визначення швидкості вітання та коефіцієнта парусності насіння цукрових буряків засипали в обичайку, встановлену в аеродинамічну трубу. Потім, з міркувань безпеки, перевіряли кріплення обичайки та справність вузлів установки. Закривали дросельну заслінку й вмикали привід вентилятора. Повертаючи рукоятку, поступово відкривали дросельну заслінку до появи явища вітання окремих насінин буряка. Після цього вимірювали динамічний напір за допомогою багатфункціонального вимірювального приладу Testo 435-3 і зважували порцію насіння, що потрапила у відстійник.

На наступному етапі збільшували величину розрідження на 5 Па та проводили вимірювання маси насіння з відстійника. Дослід повторювали до тих пір, поки в обичайці не закінчувався насінневий матеріал. Таким чином проводили вимірювання швидкості вітання насіння для класів: $di \geq 4,5$ мм; $4,0$ мм $\leq di < 4,5$ мм; 3 мм $< di < 4,0$ мм.

Кут внутрішнього тертя визначали за допомогою приладу, що складається з основи, воронки, закріпленої на штативі, та виміральної лінійки (рисунок 3.6).



Рис. 2.7. Установка для визначення кута внутрішнього тертя насіння: 1 – підймальний механізм, 2 – підставка, 3 – воронка, 4 – основа.

Вимірювання проводили за такою методикою: основу лотка 4 встановлювали в горизонтальній площині, опускали воронку 3 у нижнє положення та починали пересипати матеріал із ємності у воронку. Потім за допомогою лінійки вимірювали висоту конуса та радіус основи у чотирьох радіальних напрямках [2]. Вимірювання виконували з трикратною повторюваністю.

Визначення об'ємної маси насіння проводили за допомогою мензурки та лабораторних ваг (рис. 2.8). Показник вимірювали у такій послідовності: у мензурку насипали 250 мл насіння, після чого вимірювали їхню масу,

виключивши масу тари. Вимірювання виконували з п'ятикратною повторюваністю. Дані заносили до журналу випробувань.



Рис. 2.8. Установка для визначення об'ємної маси насіння

Визначення коефіцієнта присмоктування здійснювали за допомогою висівного апарата установки без розподільника (рис. 2.2). Розрідження у вакуумній камері встановлювали більшим за рекомендоване виробником. Далі виконували налаштування відбивача на однонасінневий висів дражованого насіння цукрових буряків, для якого раніше були уточнені фізико-механічні властивості. Частоту обертання висівного диска встановлювали 10 об./хв, що відповідає кутовій швидкості 1,05 рад/с. Після встановлення сталого режиму роботи установки привод висівного диска вимикали. Потім змінювали лоток для збору насіння на порожній і зменшували значення розрідження на 10 Па, фіксуючи в журналі кількість впалих насінин до моменту їх повного відриву від диска.

Досліди проводили для кожного значення розрідження з 10-кратною повторюваністю. Експеримент із визначення ймовірності заповнення отворів диска залежно від середньої частоти його обертання та розрідження у вакуумній камері проводили на лабораторній установці кафедри сільськогосподарських машин, тракторів і автомобілів [1]. Методика експериментальних досліджень частково викладена у роботах [2].

На установці встановлювали потрібне значення розрідження за допомогою регулятора, числове значення якого контролювали вакуумметром, розміщеним

на виході з камери розрідження. Після цього вмикали привід висівного диска та регулювали його частоту обертання за допомогою частотного перетворювача.

Далі протягом однієї хвилини збирали порцію висівного насіння, яку згодом зважували на вагах, після чого отримане значення заносили до журналу.

З метою зменшення похибки експеримент проводили з трикратною повторюваністю та перевіряли достовірність вимірювань за допомогою критерію Стьюдента. Потім виконували аналогічні дослідження за інших значень розрідження.

Результати фіксували у лабораторному журналі у форматі Excel та графічно подавали у вигляді точок залежності $\psi = f(\omega, H)$, до яких у програмах математичного моделювання Maple та IPython [5] підбирали апроксимувальну функцію.

Завдання експериментального дослідження щодо якості розподілу потоку висівного насіння розподільником полягало у визначенні інтервалу створюваного тиску, за якого можливе ефективне розділення насіння цукрових буряків. Експеримент проводили таким чином: за допомогою редукційного клапана встановлювали фіксоване значення надлишкового тиску та відкривали клапан подачі повітря до форсунки. Потім посівний матеріал подавався висівним апаратом у розподільник. Після цього здійснювали підрахунок насіння, переміщеного повітряним потоком (розташованого у правому лотку за ходом руху), та непроміщеного насіння (що залишалося у лівому лотку).

Експеримент проводили при тисках 0,05; 0,1; 0,15; 0,17 МПа, які контролювали за допомогою манометра на ресивері установки. Далі проводили статистичну обробку експериментальних даних і встановлювали закономірності можливості переміщення насіння повітряним потоком залежно від створюваного тиску в пневмосистемі.

Після обґрунтування раціонального значення тиску виконували експериментальні дослідження щодо якості розподілу насіння цукрових буряків розподільником потоку. Для цього камеру закріплювали на штативі та

спрямовували об'єктив на вихід розподільника. Далі запускали висівний апарат разом із розподільником, після чого проводили відеозйомку процесу розділення насіння розподільником. Відеоматеріал переглядали покадрово та у лабораторному журналі фіксували момент часу в мілісекундах, коли падало насіння, у який лоток і в якій кількості.

Експериментальні дослідження з оцінки якості розділення потоку насіння проводили при швидкостях обертання диска 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 рад/с. Після роботи висівного апарата з розподільником підраховували порції насіння, що потрапили у правий і лівий лотки, та заносили значення до лабораторного журналу.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Визначення коефіцієнта присмокування насіння до висівного диска

Коефіцієнт присмокування визначали відповідно до методики, описаної в розділі 2. На лабораторній установці створювали розрідження 3000 Па, яке забезпечувало стабільну роботу висівного апарата. Після вимкнення приводу висівного диска встановлене розрідження зменшували до початку падіння насіння з отворів згідно з методикою. За результатами досліджень отримано залежність імовірності утримання насіння біля отворів диска від значення розрідження. Графічну залежність середніх значень імовірності утримання насіння від розрідження наведено на рисунку 3.1.

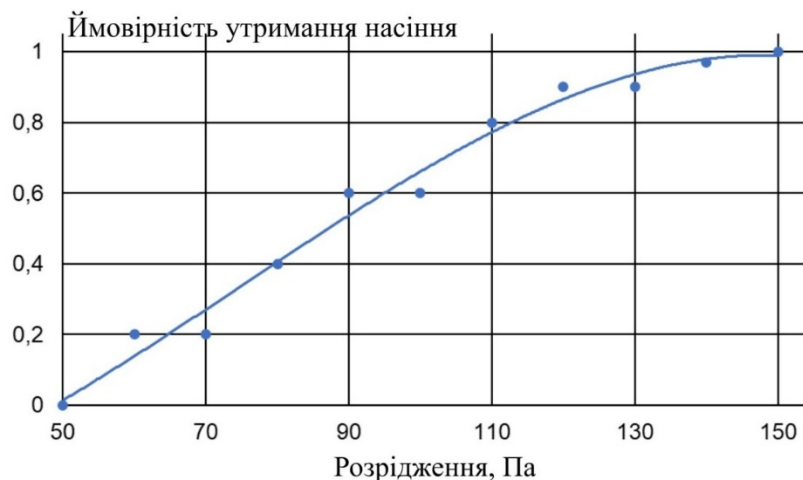


Рис. 3.1. Графік залежності ймовірності утримання насіння від розрідження у вакуумній камері.

З рис. 3.1 видно, що зі поступовим зменшенням розрідження ймовірність утримання насіння знижується за поліноміальною залежністю. При розрідженні 150 Па ймовірність утримання насіння дорівнює 1, що свідчить про повне утримання посівного матеріалу. За зменшення глибини вакууму до 130 Па

починається відрив насіння, тому було взято середнє значення між цими двома показниками.

Значення коефіцієнта присмокування та експериментальні дані, використані для його розрахунку, наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Зведена таблиця показників для цукрових буряків

| Показник | Буряк |
|--|----------------------|
| Маса, г | 0,0286 |
| Приведений діаметр насінини, м | $4,42 \cdot 10^{-3}$ |
| Розрідження присмокування, за якого виникає ймовірне падіння насіння, Па | 140 |
| Площа присмокуваної поверхні насінини, м ² | $4,2 \cdot 10^{-6}$ |
| Співвідношення площі поверхні насінини до площі отвору | 1,10 |
| Співвідношення діаметра отвору до діаметра насінин | 0,56 |
| Коефіцієнт присмокування | 0,92 |

З представлених результатів можна зробити висновок, що для дражованого насіння цукрових буряків, використаного в дослідженнях, коефіцієнт присмокування можна прийняти рівним 0,92. Проте він може змінюватися як у меншу, так і в більшу сторону залежно від складу драже, зміни форми та стану поверхні насіння під час зберігання й транспортування. Тому для використання в розрахунках його значення може прийматися в межах від 0,85 до 0,95.

Підвищення коефіцієнта присмокування, значення якого визначено експериментально, порівняно зі довідковими даними можна пояснити зміною форми дражованого насіння та стану його поверхні.

3.2 Дослідження якісних показників роботи висівного апарата залежно від швидкості обертання диска та глибини розрідження

Результати експерименту щодо виявлення закономірності залежності ймовірності заповнення отворів диска від колової швидкості та створюваного

розрідження у вакуумній камері [5] наведені у вигляді таблиці зі значеннями маси висіяного насіння за одну хвилину при визначеній швидкості обертання диска. Результати експерименту для розрідження 10 мбар для трьох повторів подано в табл. 3.2.

Графічні залежності середніх значень ймовірності заповнення від швидкості обертання диска для розріджень 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 мбар наведено на рисунку 3.2.

На рисунку 3.2 точками позначено експериментальні дані, а лініями — їх аппроксимацію. З графічних залежностей видно, що однакова ймовірність заповнення може бути досягнута за різних поєднань розрідження та швидкості обертання диска.

Таблиця 3.2 – Маса висіяного насіння за хвилину при різних швидкостях обертання диска для розрідження 10 мбар

| Швидкість, рад/с | Маса насіння, г | | |
|------------------|-----------------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| 1 | 5,2 | 4,9 | 5 |
| 1,5 | 7,5 | 7,7 | 7,5 |
| 2 | 9,9 | 9,7 | 9,5 |
| 2,5 | 11,4 | 10,6 | 11 |
| 3 | 10,7 | 11,7 | 10,9 |
| 3,5 | 10,2 | 9,3 | 10,2 |
| 4 | 7 | 6,9 | 7 |
| 4,5 | 4,8 | 3,8 | 4,6 |
| 5 | 2,7 | 2,7 | 3 |
| 5,5 | 1,5 | 2 | 2,3 |
| 6 | 1,5 | 1,2 | 1,3 |

Таким чином, для дотримання агротехнічних вимог щодо ймовірності заповнення отворів диска не нижче 0,97 при розрідженні 10 мбар швидкість обертання не повинна перевищувати 1 рад/с. Таке саме значення ймовірності заповнення може бути досягнуте при розрідженні 20 мбар і швидкості диска не більше 2 рад/с.

Збільшення швидкості обертання диска до 3 рад/с потребує розрідження не менше 30 мбар. Підвищення розрідження до 50 мбар для забезпечення ймовірності заповнення понад 0,97 уже дає змогу збільшити швидкість до 6 рад/с. Для швидкості обертання диска понад 6 рад/с агротехнічні вимоги щодо заповнення отворів можуть виконуватися за розрідження не менше 60 мбар.

Отже, при висіві насіння цукрових буряків з великою швидкістю обертання висівного диска необхідно збільшувати значення розрідження.

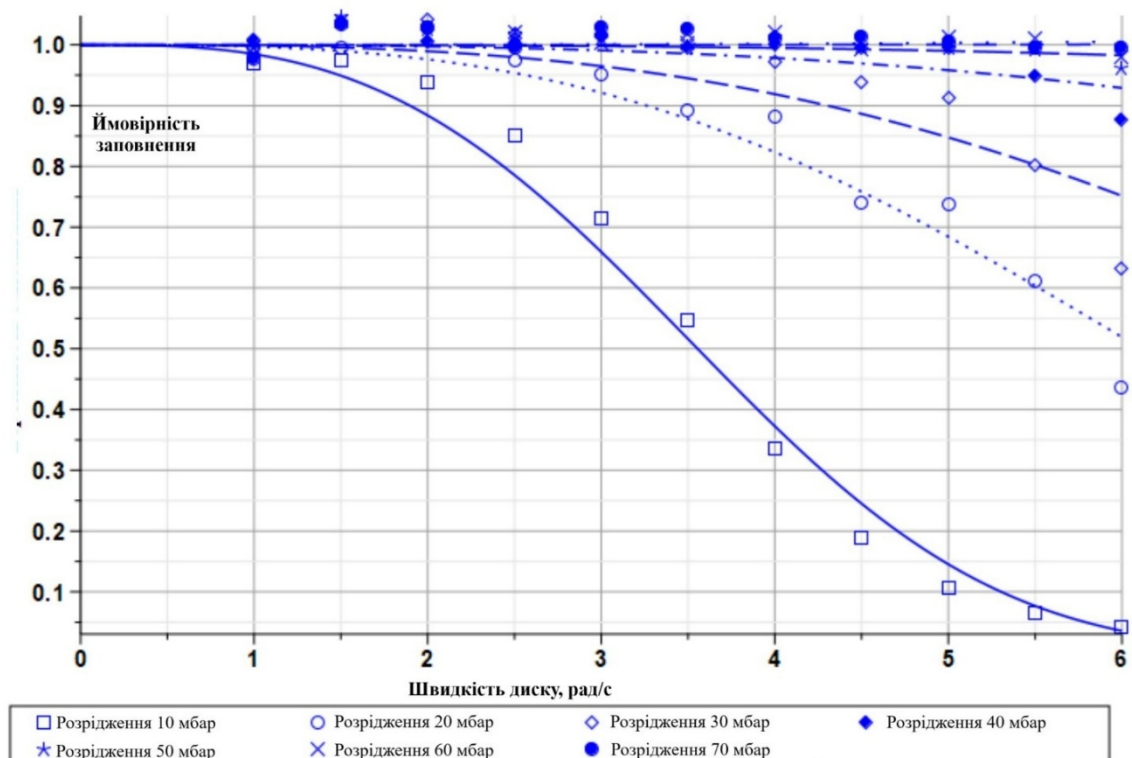


Рис. 3.2. Експериментальна залежність ймовірності заповнення отворів висівного диска від швидкості обертання диска та глибини розрідження

Оскільки ймовірність заповнення отворів наближається до експоненціальної, можна висунути гіпотезу, що ймовірність заповнення отворів ψ може бути описана диференціальним рівнянням коливань для аперіодичного режиму.

Зі збільшенням розрідження у вакуумній камері коефіцієнт b_p зменшується за гіперболічною залежністю. Для розрідження 10 мбар його значення становить 0,1049. При підвищенні до 20 мбар воно зменшується до 0,02. За глибини вакууму понад 50 мбар коефіцієнт стає меншим за 0,002.

Графічне представлення диференціального рівняння коливань імовірності присмокування для диска $2,2 \times 48$ наведено на рис. 3.3. Для диска $2,5 \times 18$ результат апроксимації показано на рис. 3.4. На поданих рисунках, окрім графічної залежності, наведено універсальну формулу розрахунку ймовірності заповнення отворів.

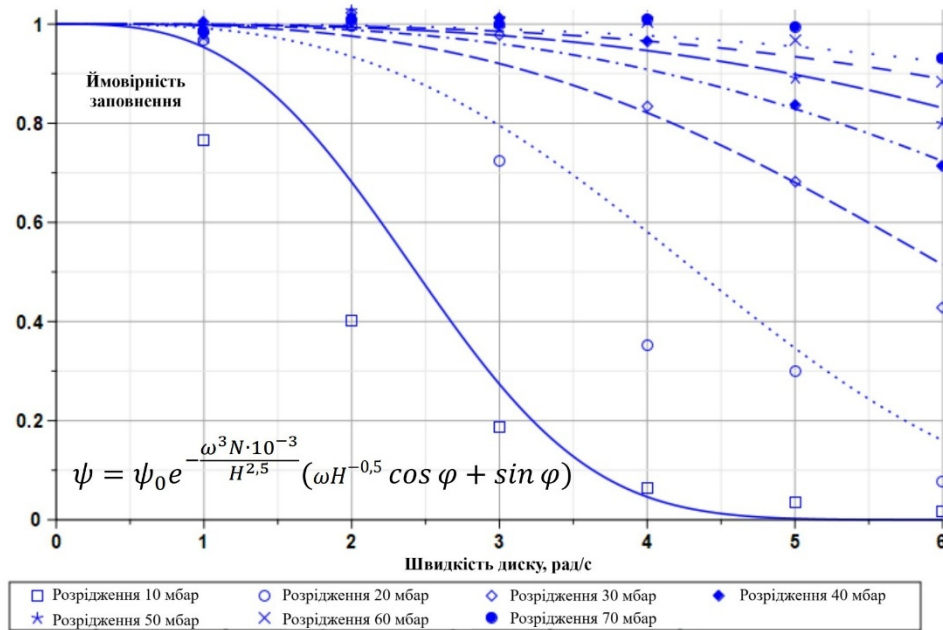


Рис. 3.3. Залежність імовірності заповнення отворів диска від швидкості обертання та глибини розрідження для диска $2,2 \times 48$

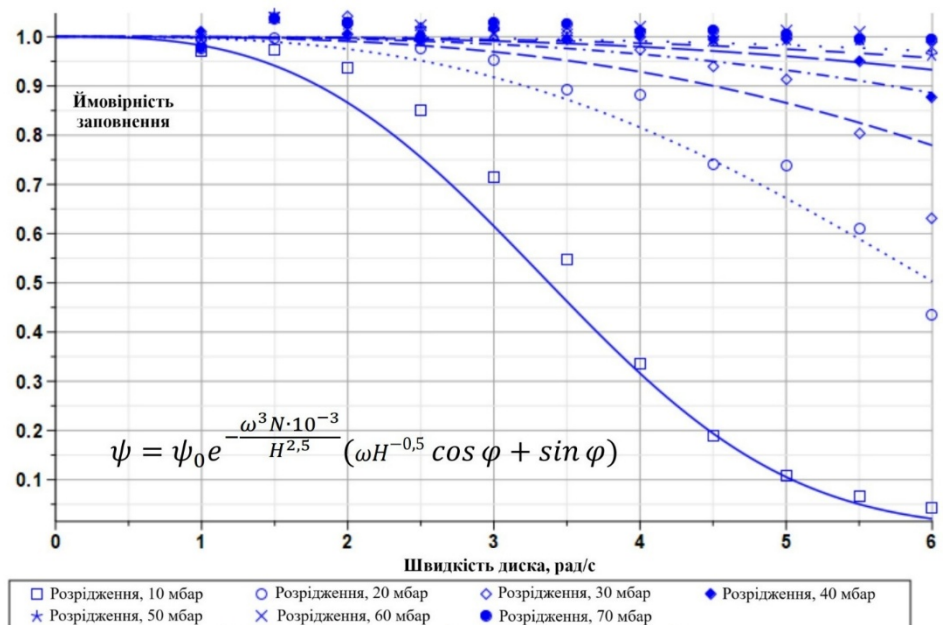


Рис. 3.4. Залежність імовірності заповнення отворів диска від швидкості обертання та глибини розрідження для диска $2,5 \times 18$.

Для знаходження раціональних співвідношень значень кутової швидкості диска ω та розрідження H в рівнянні значення ймовірності приймається рівним $\psi = 1$, а для визначення граничного співвідношення показників, за якого виконуються вимоги щодо заповнення отворів диска, приймається $\psi = 0,97$.

Оцінювання достовірності нелінійної регресії в сучасних прикладних програмах математичного моделювання є утрудненим, тому ми зводили нелінійну залежність до лінійної шляхом логарифмування значень ймовірності заповнення отворів. Для перевірки адекватності рівняння регресії для кожного значення розрідження було використано критерій Фішера.

Для оцінювання процесу присмоктування коефіцієнтом запасу присмоктувальної сили наведено експериментальні дані зміни ймовірності заповнення отворів диска та цього коефіцієнта залежно від кутової швидкості диска за різних значень розрідження (рис. 3.5).

На рисунку 3.5 видно, що за низьких значень розрідження експериментальні значення ймовірності розташовані як вище, так і нижче графіка коефіцієнта запасу присмоктування, що свідчить про низьку ймовірність заповнення отворів диска [7, 9]. При розрідженні 30 мбар крива коефіцієнта запасу присмоктування розташована вище експериментальних значень і перевищує 1 при швидкостях диска менше 3,5 рад/с.

При значеннях розрідження понад 40 мбар крива коефіцієнта запасу присмоктувальної сили лежить вище експериментальних значень ймовірності заповнення, і навіть при кутових швидкостях висівного диска до 5 рад/с значення коефіцієнта перевищує одиницю. Для забезпечення швидкості висівного диска 5...6 рад/с розрідження повинно становити 50 мбар і більше, що відповідатиме значенню коефіцієнта запасу, більшому за 1.

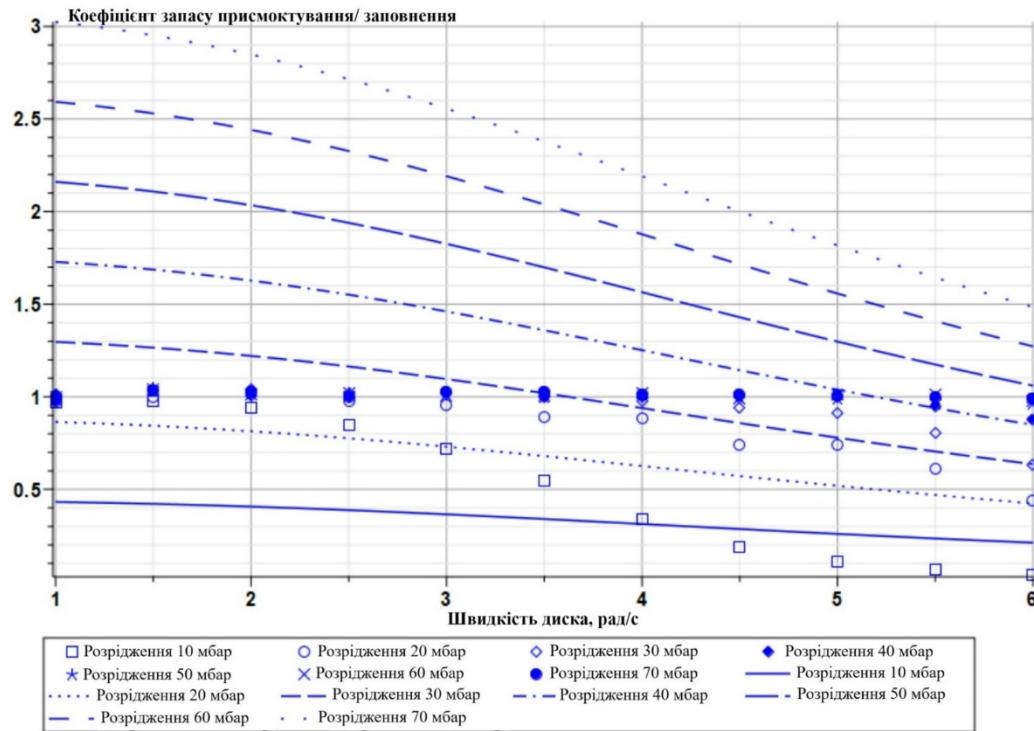


Рис. 3.5. Залежності коефіцієнта запасу присмокування та ймовірності заповнення отворів диска від швидкості обертання диска і розрідження

Таким чином, зі збільшенням коефіцієнта запасу присмокувальної сили ймовірність присмокування насіння до отворів у меншій мірі залежатиме від випадково виникаючих сил опору, а відповідно і від кутової швидкості висівного диска.

Графічні залежності зміни відношення коефіцієнтів запасу присмокувальної сили до ймовірності заповнення отворів від швидкості диска наведені на рис. 3.6.

З рис. 3.6 видно, що відношення коефіцієнта запасу присмокувальної сили до ймовірності заповнення за запропонованою методикою набуває значення, близького до 1, що свідчить про те, що запропонований математичний апарат може з певною точністю прогнозувати ймовірність заповнення отворів диска. Аналогічне відношення для загальноприйнятої методики набуває значень від 0,8 до 4,5. Порівняно велике відношення рівнодійної сил опору за запропонованою методикою до аналогічної сили, визначеної за загальноприйнятою методикою,

при низьких швидкостях пов'язане з тим, що в останній не враховуються сили лобового опору.

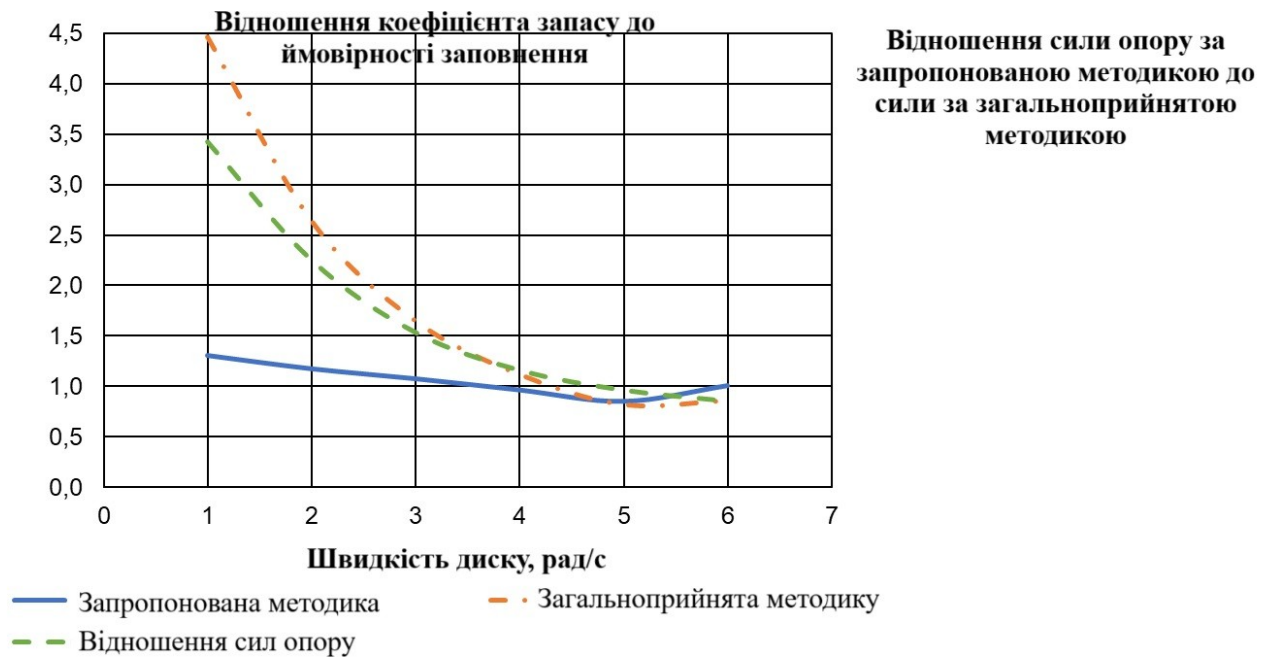


Рис. 3.6. Порівняльний аналіз методик розрахунку

Отже, запропонований математичний апарат може адекватно описувати процес присмоктування дражованого насіння цукрових буряків та з певною точністю прогнозувати ймовірність заповнення отворів диска, що визначається експериментальною залежністю.

3.3. Експериментальні дослідження з розподілу насіння цукрових буряків розподільником потоку до висівного апарата

Під час проведення експерименту режим роботи висівного апарата встановлювали таким: кутова швидкість диска 1 рад/с, розрідження — 30 мбар.

Тиск у пневмосистемі розподільника встановлювали на рівні 0,05; 0,10; 0,15; 0,17 МПа за допомогою редукційного клапана. Для виключення можливих випадків, пов'язаних із нестабільною роботою керувального механізму та клапана подачі повітря у розподільнику, усі насінини, що потрапляли у розподільник через отвори висівного диска, піддавалися впливу повітряного

поток. Ймовірність зміщення оцінювали як відношення кількості зміщених насінин до загальної кількості, що надійшла у розподільник.

Результати дослідження наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати експерименту з дослідження розподілу насіння

| Тиск, 10^5 Па | Ймовірність зміщення насіння повітряним потоком | | | |
|-----------------|---|------|------|---------|
| | Повторності | | | Середнє |
| | 1 | 2 | 3 | |
| 0,5 | 0,85 | 0,93 | 0,86 | 0,88 |
| 1,0 | 0,97 | 0,89 | 0,96 | 0,94 |
| 1,5 | 0,95 | 1,01 | 1,00 | 0,99 |
| 1,7 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 0,98 |

З даних, наведених у табл. 3.3, видно, що більш повне зміщення насіння повітряним потоком відбувається при тиску 0,1...0,15 МПа. За тиску 0,15...0,17 МПа зміщується 98...99% поданого насіння. За результатами теоретичних досліджень тиск у пневмосистемі має становити 0,12...0,14 МПа. З огляду на незначну різницю між теоретичними та експериментальними значеннями, раціональним режимом можна вважати тиск 0,15...0,17 МПа.

Отримане раціональне значення тиску було використано у подальших дослідженнях під час оцінки якості розподілу насіння залежно від частоти обертання висівного диска. Оброблені результати експерименту наведено в таблиці 3.4 і подано на рисунках 3.7–3.8.

Таблиця 3.4. Результати експерименту з дослідження якості розподілу насіння розподільником залежно від частоти обертання висівного диска

| Частота обертання диска, рад/с | Відносна маса насіння | | Якість розподілу, % | Ймовірність заповнення, % |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|---------------------------|
| | у лівому сошнику | у правому сошнику | | |
| 1,0 | 0,500 | 0,500 | 100,0% | 100,0% |
| 1,5 | 0,507 | 0,495 | 98,7% | 99,7% |
| 2,0 | 0,508 | 0,490 | 98,0% | 99,4% |
| 2,5 | 0,517 | 0,485 | 96,8% | 98,2% |

Аналіз результатів показує, що закономірність зниження якості розподілу зі зростанням кутової швидкості диска є близькою до лінійної в межах проведеного експерименту — 0,5...2,5 рад/с. Також слід зазначити, що рівняння регресії для відносних мас у лівому та правому рядках описуються лінійною залежністю, де тангенс кута нахилу прямої для відносної маси в правому рядку становить $-0,007$, а в лівому — $0,007$.

На якість розподілу насіння розподільником впливає і ймовірність заповнення отворів диска, яка має бути близькою до 100%. За кутової швидкості диска до 1,7 рад/с ймовірність заповнення отворів перевищує 99%, а якість розподілу — 97,5%. Зниження якості розподілу нижче 97% спостерігається при збільшенні кутової швидкості диска понад 2,2 рад/с, при цьому ймовірність заповнення залишається вищою за 98%.

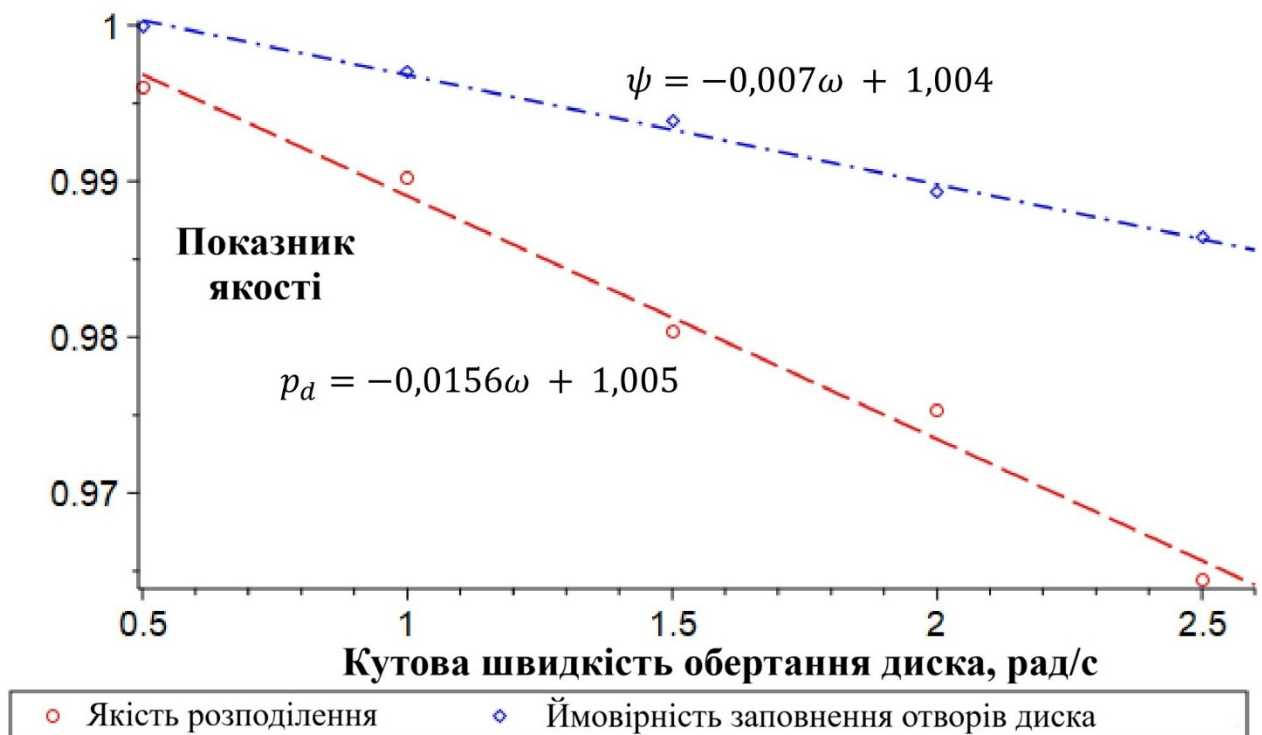


Рис. 3.7. Залежність показників якості розподілу насіння від частоти обертання висівного диска

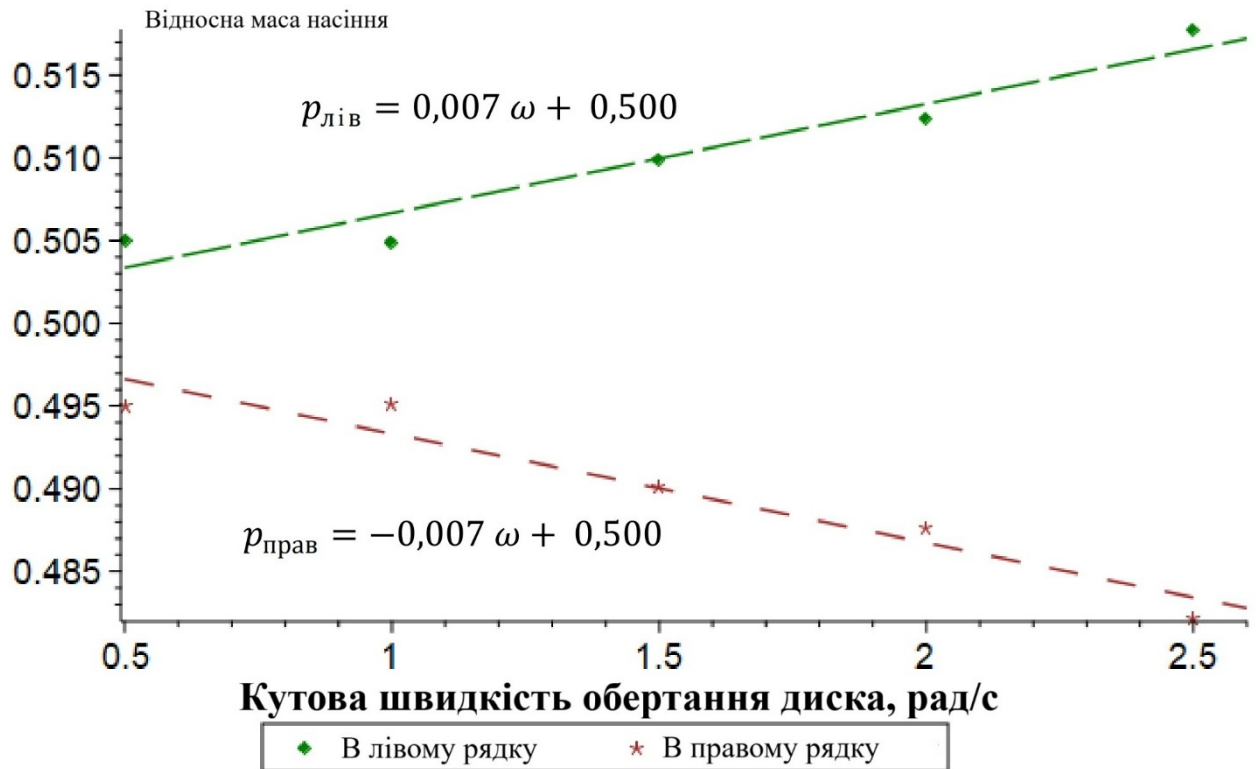


Рис. 3.8. Залежності відносної маси насіння у лівому та правому рядках від частоти обертання диска.

Розподіл насіння між стрічками, сформований розподільником від одного висівного апарата, наведено на рис. 3.8. Із поданих графічних залежностей видно, що неспрацювання механізму розподілу призводить до зменшення показника відносної маси насіння для правої стрічки та, відповідно, до збільшення аналогічного показника для лівої стрічки.

Після відеохронометражу було сформовано віртуальну стрічку розподілу насіння, що сходить із розподільника (рис. 3.9).

На її графічній інтерпретації видно, що насіння, зміщені пневмосистемою, умовно подані вище осі абсцис, а ті, що не зміщені - нижче.

Ламаною лінією на графіку позначено послідовність розподілу насіння в стрічках залежно від переміщення висівного апарата з розподільником.

Відстані між насінинами вище та нижче осі відображають розкид між інтервалами їх розміщення в стрічках. Наявність горизонтальної лінії, що з'єднує два сусідні насіння без перетину осьової лінії, свідчить про те, що насіння не були зміщені розподільником або що два насіння були подані одним отвором.

Наявність горизонтальної лінії, яка з'єднує два сусідні насіння в одній стрічці та одночасно відсутність насіння навпроти з іншого боку осі, а також збільшений інтервал між сусідніми насінинами є ознакою проходження отвору диска без насіння.

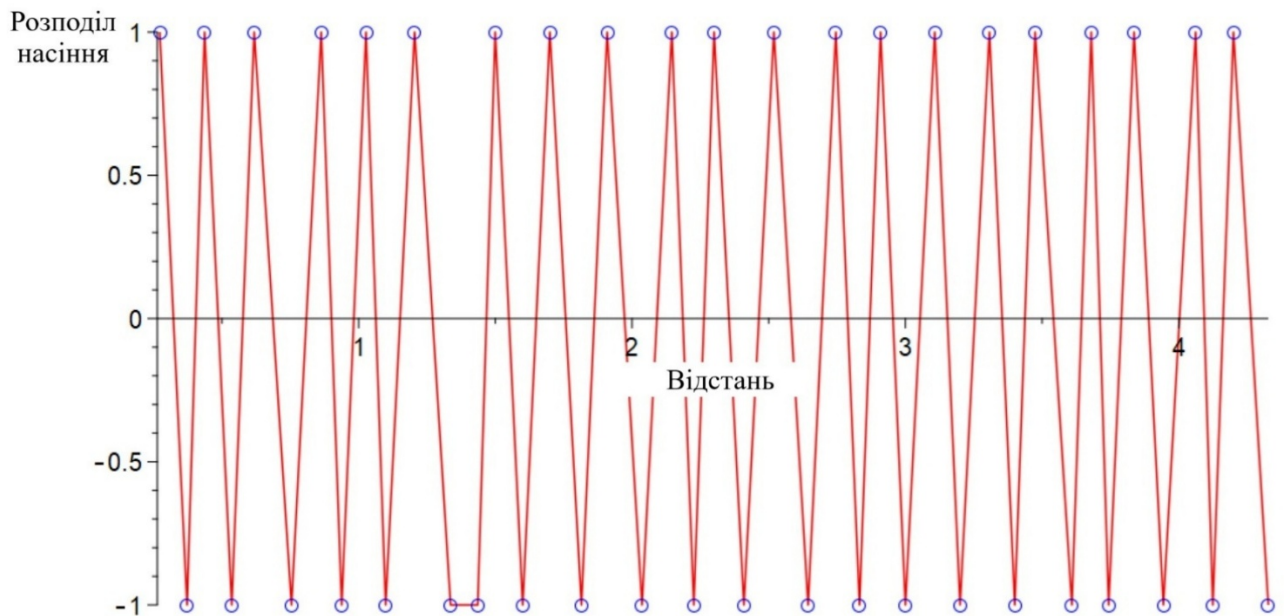


Рис. 3.9. Розподіл насіння у дві стрічки одним висівним апаратом

Отримане розміщення насіння на віртуальній стрічці було опрацьовано статистичними методами, у результаті чого для кожної стрічки були визначені математичне сподівання, що характеризує середній інтервал розміщення насіння в борозні, дисперсія, середнє квадратичне відхилення та коефіцієнт варіації.

Розподіл інтервалів розміщення насіння, що сходять із розподільника, у лівій і правій стрічках наведено на рис. 3.10. На рисунку, поряд з експериментальними значеннями, подані криві густини розподілу Гауса, побудовані з урахуванням статистичних характеристик, наведених у табл. 3.5.

Таблиця 3.5. Статистичні характеристики розподілу інтервалів у рядках, сформованих розподільником

| Показники | Математичне сподівання | Середнє квадратичне відхилення | Коефіцієнт варіації |
|------------|------------------------|--------------------------------|---------------------|
| Лівий ряд | 0,1883 | 0,033 | 0,1794 |
| Правий ряд | 0,1863 | 0,036 | 0,1929 |

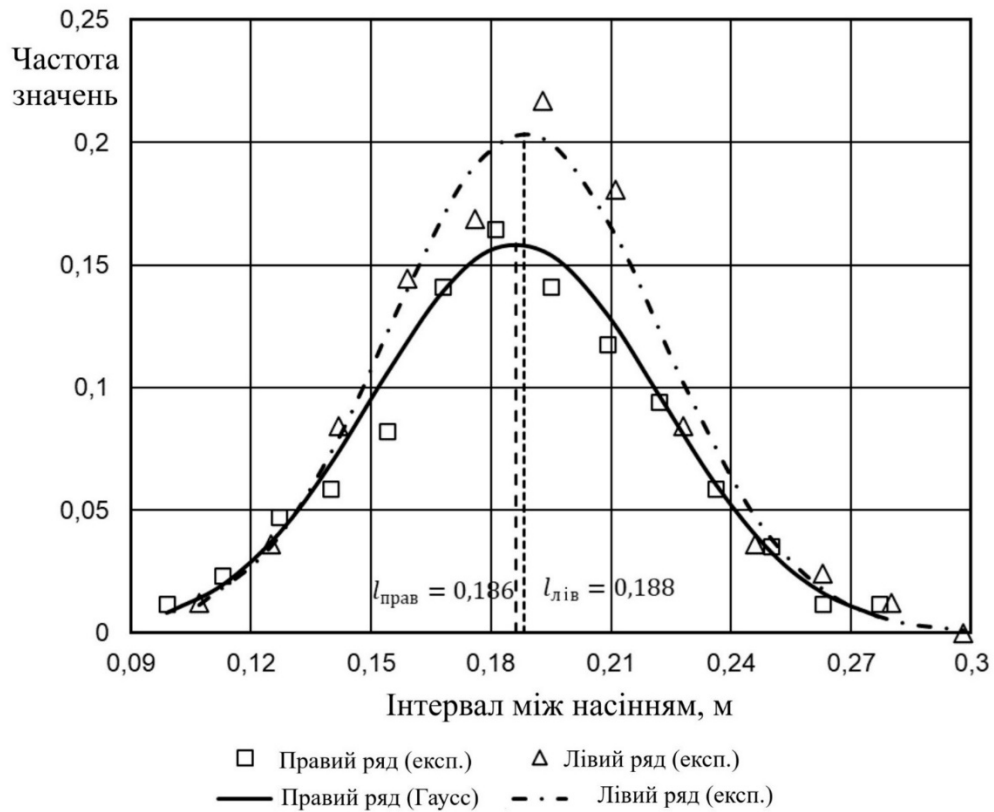


Рис. 3.10. Розподіл інтервалів між насіннями в стрічках

Під час аналізу результатів обробки експериментальних даних встановлено, що середній інтервал розміщення насіння у лівій і правій стрічках у середньому становить 18,5 см. Це свідчить про те, що рекомендований інтервал 13–19 см дотримується, а норма висіву в такому разі становить 5...6 шт. насінин на метр у стрічці. Коефіцієнт варіації розміщення насіння для лівого та правого рядів становить менше 0,33 (33%). Це вказує на те, що розподіл наближений до розподілу Гауса. Частка інтервалів між насіннями менше 0,13 і більше 0,26 м, що виникають через відсутність насінини або присмоктування до отвору більш ніж однієї насінини, становить близько 3%, що при ймовірності заповнення 97% є цілком прийнятним.

Отже, розроблений розподільник потоку насіння до висівного апарата секції сівалки точного висіву, призначений для сівби насіння цукрових буряків за схемою 45+15 см, не потребує внесення змін у конструкцію висівного апарата [6] і виконує свою функцію задовільно. А це означає, що він може бути використаний у насінницьких господарствах, які спеціалізуються на виробництві

штеклінгів. Підвищення точності роботи пристрою можливе завдяки удосконаленню конструкції інжекторної пневмосистеми, зокрема форми та розмірів повітряної камери. Також слід розглянути можливість заміни надлишкового тиску на розрідження.

Висновки по розділу

Коефіцієнт присмоктування, який показує відношення присмоктувальної сили, що діє на насінину, до створюваної сили, для дражованого насіння, використаного в дослідженнях, становив 0,92. З урахуванням його зміни через склад драже, форму та стан поверхні під час зберігання і транспортування у розрахунках він може приймати значення від 0,85 до 0,95.

Виконання агротехнічних вимог (ймовірність заповнення >97%) для дражованого насіння цукрових буряків при встановленні розрідження 30 мбар забезпечується за кутової швидкості диска до 4 рад/с. За збільшення швидкості до 5 рад/с необхідно встановлювати розрідження 40 мбар, а до 6 рад/с — 50 мбар. У цьому разі коефіцієнт запасу присмоктувальної сили за менших швидкостей становитиме $2,0 \pm 0,5$.

Якісна робота розподільника забезпечується нагнітальним повітряним потоком у повітряній камері діаметром 0,01 м при тиску 0,15...0,17 МПа. Розроблений розподільник забезпечує розподіл насіння на дві стрічки із середнім інтервалом розміщення у лівій та правій стрічках відповідно 18,8 і 18,6 см при розрахунковому інтервалі 18,2 см. Коефіцієнт варіації розміщення насіння для лівого та правого рядів становить 17,9 і 19,2 %.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

За сприятливих погодних умов та інтервалі між насінинами в рядку в перший рік посіву від 13 до 19 см використання схеми міжрядь 45+15 см порівняно зі стандартним міжряддям 45 см забезпечує збільшення середньої урожайності насіння на другий рік вегетації на 30 ц/га.

У результаті моделювання процесу захоплення дражованого насіння цукрових буряків з урахуванням сил лобового опору та інерції насіння в момент присмокування визначено необхідне розрідження у висівному апараті 30 мбар при кутовій швидкості диска не більше 4 рад/с. Збільшення швидкості до 5 рад/с вимагає підвищення розрідження до 40 мбар, а до 6 рад/с – до 50 мбар.

Коефіцієнт запасу присмокувальної сили, що оцінює здатність сили присмокування протистояти нестабільності сил опору і визначається як відношення присмокувальної сили до результуючої сили опору, повинен становити $2,0 \pm 0,5$.

Розподільник насіння на два потоки від одного висівного апарата необхідно обладнати збірним лотком подачі насіння у повітряну камеру, форма якого описується рівнянням $f(x) = 100x^2 - 6x + 0,09$, довжиною 0,035 м, висотою 0,1 м зі зміщенням у поздовжній вертикальній площині на 0,005 м від місця виходу насіння. Вихідні відводи розподільника, нахилені відносно горизонтальної лінії у поперечному напрямку на 45° , встановлюються зі зміщенням щодо центра висівного апарата на 0,075 м. При цьому сумарний час руху насіння в розподільнику з моменту відриву від диска до виходу з лівого та правого відводів становить відповідно 0,404 та 0,398 с.

Якісна робота розподільника забезпечується нагнітальним повітряним потоком у повітряній камері діаметром 0,01 м при тиску 0,15...0,17 МПа, причому кутова швидкість диска не повинна перевищувати 2 рад/с.

Розроблений розподільник забезпечує розподіл насіння на дві стрічки із середнім інтервалом розміщення у лівій та правій стрічках відповідно 18,8 і 18,6

см за розрахункового інтервалу 18,2 см. Коефіцієнт варіації розміщення насіння для лівого та правого рядів становить 17,9 і 19,2 %, що підтверджує наявність нормального розподілу в стрічці.

Експериментально визначено коефіцієнт присмокування, який показує ступінь використання присмокувальної сили, і який для дражованого насіння цукрових буряків може змінюватися в межах 0,85...0,95.

Підприємствам, що виготовляють посівну техніку, можна рекомендувати виготовлення розробленого розподільника як пристосування до пневматичних висівних апаратів сівалок точного висіву для реалізації схеми міжрядь 45+15 см, що не потребує суттєвих змін у конструкції базових вузлів сівалки. Розподіл насіння на дві стрічки з міжряддям 15 см здійснюється за допомогою нагнітального повітряного потоку, який створюється пневмосистемою розподільника при тиску 0,15...0,17 МПа, при цьому кутова швидкість диска не повинна перевищувати 2 рад/с.

У якості перспектив подальшої розробки теми слід зазначити такі напрями: підвищення точності роботи розподільника, що може бути досягнуто шляхом удосконалення конструкції інжекторної пневмосистеми, зокрема форми та розмірів повітряної камери; дослідження можливості заміни надлишкового тиску у форсунці розподільника на розрідження, що дасть змогу використовувати пневматичну систему, встановлену на сівалках точного висіву; вивчення можливості розподілу розробленим розподільником потоку насіння інших технічних культур, які можуть висіватися стрічковим способом за аналогічною схемою міжрядь.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Волоха М.П. Дослідження процесу висіву насіння буряка цукрового сівалками пневматичного типу. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2016. № 6.
2. Волоха М.П. Дослідження показників точності розміщення сходів буряків цукрових. Техніка і технології АПК. 2016. № 8. С. 19–21.
3. Присяжнюк О. І. Буряки цукрові – селекція, насінництво та технологія вирощування : монографія. Вінниця : ТОВ «ТВОРИ», 2022. 310 с.
4. Кобець А. С. Теорія і розрахунок сільськогосподарських машин : практикум. Дніпропетровськ : Свідлер А. Л., 2011. 164 с.
5. Аулін В. В. Висівні системи з елементами пневмоніки для пунктирної сівби. Машини та робочі процеси агропромислового виробництва. – 2016. Вип. 2. С. 32–36.
6. Панчишен С.В. Обґрунтування параметрів пневмомеханічного висівного апарата сівалки : магістерська кваліфікаційна робота. Вінниця : Вінницький національний аграрний університет, 2019.
7. Шемшур В. Д. Удосконалення посіву цукрових буряків сівалками пневматичного типу : пояснювальна записка до дипломного проекту. Дніпро : Дніпровський державний аграрно-економічний університет, 2024.
8. Загальна технологія вирощування цукрових буряків [Електронний ресурс]. The Seedcare Institute. 2016.
9. Бурякові сівалки для інтенсивних технологій вирощування цукрових буряків. Техніка і технології АПК. 2015. № 4.
10. Думич В. М. Оптимізація технології вирощування цукрових буряків. Аграрна техніка та обладнання. 2014. № 3. С. 42–46.
11. Машини для сівби, садіння та догляду за посівами : навч. посіб. / С. М. Бондар, І. І. Мельник, В. Д. Гречкосій та ін. Кропивницький : КОД, 2018. 347 с.

12. Борак К. В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.05.11 / Поліський національний університет, м. Житомир. 2021. 380.
13. Сільськогосподарські машини : підручник / В. П. Гудзенко, М. П. Роїк, О. В. Бойко та ін. Київ : Вища освіта, 2010.
14. Karayel D. Estimation of optimum vacuum pressure of air-suction type precision seed-meter using artificial neural network models. *Agronomy*. 2022. Vol. 12, No. 7.
15. Afify M. T. Mathematical model for predicting vacuum pressure of a precision vacuum seeder using onion seed properties. *Misr Journal of Agricultural Engineering*. – 2009. – Vol. 26, No. 4.
16. Bustos-Gaytán A. Design and optimization of pneumatic seed-metering devices: a review of numerical and experimental approaches / A. Bustos-Gaytán, G. Castañeda-Salinas, R. F. Escobar-Jiménez // *Smart Agricultural Technology*. 2025. Vol. 5.
17. Zhang Z. Design optimization and aerodynamic investigation of a novel air-suction seed-metering device for precision planters. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 208.
18. Kim K. Effect of seed shape and vacuum pressure on the performance of pneumatic seed metering devices. *Biosystems Engineering*. 2021. Vol. 204.
19. Роїк М. Виробництво насіння цукрових буряків : монографія. Київ : Аграрна наука, 2013.
20. ДСТУ 2240-93. Машини сільськогосподарські. Сівалки. Терміни та визначення. – Чинний від 1994-01-01.
21. ISO 7256-1:1984. Sowing equipment. Test methods Part 1: Single seed drills (precision drills). Geneva : International Organization for Standardization, 1984.
22. Precision seeders for sugar beet and other row crops : Technical catalogue. – Vaderstad AB, 2020.

23. Precision Planting technology for pneumatic seed metering systems : Operator's manual. Precision Planting LLC, 2019.
24. Monosem NG Plus pneumatic planters for sugar beet : Operator's and technical manual. Monosem, 2021.
25. Gaspardo SP precision pneumatic seed drills for sugar beet and vegetables : Product booklet. Maschio Gaspardo, 2020.
26. Борак К. В., Куликівський В. Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. Ч. 1: Теоретичні основи матеріалознавства : навч. посіб. Житомир : Поліський нац. ун-т, 2024. 101 с.
27. Сілецький Д., Андрійчук А., Груницький М., Куликівський В. Властивості вологозахисних покриттів, які застосовуються в сільськогосподарському виробництві. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С.142-146.
28. Куликівський В.Л., Боровський В.М., Андрійчук А.В., Груницький М.Р. Аналіз насіннепроводів висівних апаратів пневматичних сівалок. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 106-110
29. Грудовий Р.С., Размахін Д.В., Сілецький Д.В., Груницький М.Р., Шевчук О.А. Опис конструкції та принципу роботи сошника для внутрішньогрунтового розкидного посіву. Збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. URL : <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.