

**Козаченко О.В.,
Шкрегаль О.М.,
Калайда В.М.
Бережной А.В.**

Харківський національний технічний
університет сільського господарства ім.
П.Василенка,

м. Харків, Україна

E-mail: o.v.kozachenko21@gmail.com

Пахучий А.М.

Харківський національний аграрний
університет імені В.В.Докучаєва,
м. Харків, Україна

E-mail: andreji09773@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ДВОБАРАБАННОЇ ОБЧІСУВАЛЬНОЇ ЖНИВАРКИ ДЛЯ ЗБИРАННЯ НАСІННЯ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО

УДК 631.17; 633.1

Козаченко О.В., Пахучий А.М., Шкрегаль О.М., Калайда В.М., Бережной А.В. «Оптимізація параметрів двобарабанної обчисувальної жнивarki для збирання насіння льону олійного»

В роботі представлено результати експериментальних досліджень обґрунтування раціональних конструктивно-режимних параметрів жнивarki для збирання насіння льону олійного методом обчисування рослин на корені. Обробкою результатів математичного моделювання процесу сепарації вороху в жниварці обчисувального типу з криволінійною формою кожуха із врахуванням фізико-механічних властивостей його компонентів встановлено, що значущими факторами процесу є такі конструктивно-режимні параметри: частота обертання бітера-відбивача n_1 і обчисувального барабана n_2 , положення прозорі зони границі L повітряної сітки кожуха і її ширина B . Експериментальними дослідженнями процесу сепарації вороху в жниварці встановлено залежності масової частки відходу лушпиння і часточок стебла з її області δ_n , частки відходу насіння і коробочок із насінням δ_n і потужності P , що споживається, від частоти обертання бітера-відбивача n_1 і обчисувального барабана n_2 , положення повітряної сітки L і її ширини B . Виділені, як найбільш значущі такі конструктивно-режимні параметри жнивarki обчисувального типу для збирання насіння льону олійного: частота обертання бітера-відбивача $n_1 = 892$ об/хв., частота обертання обчисувального барабана $n_2 = 652$ об/хв., положення повітряної сітки $L = 0,62$ м і її ширина $B = 0,56$ м. При цьому масова частка відходу лушпиння і часточок стебла складає $\delta_n = 47,5$ %, частка втрат насіння і коробочок із насінням з області жнивarki, відповідно, $\delta_n = 2,1$ %, а потужність, що споживається на виконання процесу, $P = 2,7$ кВт. Статистичний аналіз показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичними і експериментальними даними складає 0,88-0,95, відносна похибка оптимальних значень 4,6 %. Наочне і статистичне порівняння теоретичних і експериментальних даних підтвердило адекватність математичних моделей, які розроблено в результаті теоретичних досліджень.

За результатами виконаних експериментальних досліджень можна стверджувати про корисність їх застосування для інженерних розрахунків при створенні нових технічних засобів для збирання врожаю сільськогосподарських культур методом обчисування рослин на корені.

Ключові слова: обчисувальна жнивarka, технологія обчисування рослин на корені, льон олійний, оптимальні конструктивно-режимні параметри.

Козаченко А.В., Пахучий А.М., Шкрегаль А.Н., Калайда В.М., Бережной А.В. «Оптимизация параметров двухбарабанной очесывающей жатки для уборки семян льна масличного»

В работе представлены результаты экспериментальных исследований обоснования рациональных конструктивно-режимных параметров жатки для уборки семян льна масличного методом очеса растений на корню. Обработкой результатов математического моделирования процесса сепарации вороха в жатке очесывающего типа с криволинейной формой кожуха с учетом физико-механических свойств его компонентов установлено, что значимыми факторами процесса есть такие конструктивно-режимные параметры: частота вращения битера-отражателя n_1 и очесывающего барабана n_2 , положение прозрачной зоны границы L воздушной сетки кожуха и ее ширина B . Экспериментальными исследованиями процесса сепарации вороха в жатке установлены зависимости массовой доли ухода шелухи и частиц стебля с ее области δ_n , доли ухода семян и коробочек с семенами δ_n и мощности P , потребляемой от частоты вращения битера-отражателя n_1 и очесывающего барабана n_2 , положение воздушной сетки L и ее ширины B . Выделенные, как наиболее значимые такие конструктивно-режимные параметры жатки очесывающего типа для сбора семян льна масличного: частота вращения битера-отражателя $n_1 = 892$ об/мин., частота вращения очесывающего барабана $n_2 = 652$ об/мин., положение воздушной сетки $L = 0,62$ м и ее ширина $B = 0,56$ м. При этом массовая доля ухода шелухи и частиц стебля составляет $\delta_n = 47,5$ %, доля потерь семян и

коробочек с семенами из области жатки, соответственно, $\delta_h = 2,1\%$, а потребляемая мощность на выполнение процесса, $P = 2,7$ кВт. Статистический анализ показал, что коэффициент корреляции между теоретическими и экспериментальными данными составляет 0,88-0,95, относительная погрешность оптимальных значений 4,6%. Наглядное и статистическое сравнение теоретических и экспериментальных данных подтвердило адекватность математических моделей, разработанных в результате теоретических исследований.

По результатам выполненных экспериментальных исследований можно утверждать о пользе их применения для инженерных расчетов при создании новых технических средств для сбора урожая сельскохозяйственных культур методом очеса растений на корню.

Ключевые слова: очесывающая жатка, технология очеса растений на корню, лен масличный, оптимальные конструктивно-режимные параметры.

Kozachenko A.V., Pakhuchiy A.M., Shkregal A.N., Kalayda V.M., Bereznoy A.V. "Optimization of parameters of a two-drum combing harvester for harvesting oilseed flax"

The paper presents the results of experimental studies of substantiation of rational design and regime parameters of the harvester for harvesting oilseed flax by combing plants at the root. Processing of the results of mathematical modeling of the heap separation process in a combing type harvester with a curved shape of the casing taking into account the physical and mechanical properties of its components found that significant process factors are the following design parameters: speed of the reflector beater n_1 the boundary L of the air grid of the casing and its width B . Experimental studies of the heap separation process in the harvester have established the dependences of the mass fraction of husk and stem particles from its area δ_h , the proportion of seeds and seed boxes δ_h and power P consumed on the speed of the reflector beater n_1 and the combing drum n_2 , air position grid L and its width B . The most significant design and mode parameters of the combing type harvester for harvesting oilseed flax are highlighted: speed of rotation of the beater-reflector $n_1 = 892$ rpm, frequency of rotation of the combing drum $n_2 = 652$ rpm. , the position of the air grid $L = 0,62$ m and its width $B = 0,56$ m. The mass fraction of waste husk and stem particles is $\delta_h = 47,5\%$, the share of losses of seeds and boxes with seeds from the harvester, respectively, $\delta_h = 2,1\%$, and the power consumed to perform the process, $P = 2,7$ kW. Statistical analysis showed that the correlation coefficient between theoretical and experimental data is 0,88-0,95, the relative error of the optimal values is 4,6%. Visual and statistical comparison of theoretical and experimental data confirmed the adequacy of mathematical models developed as a result of theoretical research.

According to the results of experimental studies, it can be argued that their use for engineering calculations in the creation of new technical means for harvesting crops by combing plants at the root.

Keywords: combing harvester, technology of combing plants at the root, oil flax, optimal design and regime parameters.

Вступ

Процес збирання сільськогосподарських культур, в тому числі льону олійного, є важливою технологічною операцією їх виробництва в аграрному секторі України. Позитивна динаміка зростання виробництва льону олійного, що зумовлено зростанням попиту на насіння на внутрішньому й зовнішньому ринках, вимагає інтенсифікації технологічних процесів збиральної техніки. Одним з перспективних напрямків інтенсифікації технічних засобів для збирання врожаю льону олійного є технологія збирання методом обчисування рослин на корені.

Актуальність проблеми

Своєчасне збирання насіння льону олійного в оптимальні агротехнічні строки за мінімальних втрат і забрудненості обчисаного вороху є однією з найважливіших наукових задач удосконалення збиральної техніки. Головна особливість даної перспективної технології збирання врожаю полягає у значному зниженні незернової частки в обчисаному вороху у порівнянні із зерностебловою масою, що надходить у молотильно-сепарувальні робочі органи традиційних зернозбиральних комбайнів. Це зумовлює необхідність підвищення показників якості, продуктивності та зменшення енергоємності технологічного процесу збирання [1-3]. При цьому суттєвий вплив на ефективність процесу збирання мають конструктивно-технологічні параметри робочих

органів, режим роботи збиральних машин, фізико-механічні властивості культури [4-6]. Проблемність застосування серійних жниварок обчисувального типу на збиранні врожаю полягає у великому різноманітті сільськогосподарських культур, відмінності за фізико-механічними властивостями рослин, недосконалості конструкцій, рівні розробки теорії процесу обчисування та проектування ефективних конструкцій технічних засобів.

При розробці обчисувального пристрою для збирання насіння льону олійного важливою задачею є вибір раціональних конструктивно-режимних параметрів, що зумовлює мінімізацію втрат насіння при виконанні процесу. Тому напрямки наукового пошуку нових технічних рішень та технологічних процесів збирання врожаю повинні передбачати теоретичний аспект вивчення проблеми та практичне підтвердження отриманих математичних моделей.

Аналіз останніх досліджень

Порівняльним аналізом [7] одно- та двобарабаних обчисувальних пристроїв доведена перевага останніх при виконанні процесу збирання врожаю методом обчисування рослин на корені. Основні положення теорії обчисування рослин сільськогосподарських культур та технічних засобів для реалізації означеного процесу було запропоновано в роботах П. А. Шабанова [8] та І. К. Голубєва [9]. Але наявні математичні моделі не розглядають комплексно процес взаємодії рослин з робочими органами обчисувальної жнивarki та вплив супутніх процесів, зокрема, повітряного потоку на сепарацію компонентів обчисаного вороху в її зоні, математичні вирази ускладнені або не мають подальшого практичного використання для створення нових ефективних технічних засобів для збирання рослин на корені.

Теоретичними дослідженнями [10 -14] встановлено, що процес збирання насіння льону олійного розробленою жниваркою обчисувального типу залежить не тільки від її конструктивно-режимних параметрів та фізико-механічних властивостей рослин та компонентів обчисаного вороху, а також від супутніх процесів, що протікають в її області. При вивченні процесів в області обчисувальної жнивarki авторами в якості фізичних моделей для чисельного моделювання були застосовані: k - ϵ модель турбулентності сполученої течії, поле сили тяжіння, модель реального газу Ван-дер-Ваальса, осереднене по Рейнольдсу рівняння Нов'є-Стокса [15, 16]. Дослідження течії повітря проводилося з використанням програмного пакету STAR-CCM+, який реалізовано на основі методу кінцевих елементів [17]. Розроблені авторами математичні моделі передбачають комплексний підхід до обчисування рослин на корені двобарабанною жниваркою і представлені у вигляді математичних залежностей у відповідності з послідовністю реалізації процесу взаємодії об'єкта (стебла рослин, компонентів обчисаного вороху) з робочими органами. При цьому враховуються вихідні параметри об'єкта при взаємодії з попереднім робочим органом обчисувальної жнивarki. Таке ж урахування відбувається при взаємодії з усіма наступними робочими органами жнивarki. В роботі [10] за результатами теоретичних досліджень процесу згинання рослини льону олійного під дією обтікача жнивarki, на основі теорії пружності, отримано рівняння його форми в декартовій системі координат у вигляді полінома другого ступеня в залежності від біометричних параметрів рослин і густоти їх стояння. В роботі одержана раціоналізована форма обтікача жнивarki, яка сприяє приведенню рослинної маси культури у «стан обчисування» шляхом нахилу рослин вперед у напрямку руху збирального комбайну, дозволяє компенсувати ярусність рослин і здійснює підготовку стебловій маси до наступного етапу – контакту з обчисувальним барабаном. В роботах [11, 12] автори теоретично дослідили процес коливання рослини льону олійного після

взаємодії з обтікачем жнивarki, припускаючи здійснення коливань в одній з головній площині стебла рослин та з урахуванням їх біометричних характеристик. За результатами математичного моделювання процесу взаємодії рослини з обчисувальним барабаном та на основі теорії коливань, отримано динамічну функцію зміни кривизни стебла в залежності від його реологічних властивостей і встановлені конструктивні параметри барабану, що забезпечують ефективне виконання процесу обчисування рослин. В іншому дослідженні [13] авторами аналітично досліджено процес взаємодії незв'язаних частинок компонентів обчисаного вороху льону олійного з гребінкою барабану жнивarki. На основі законів динаміки вирішено диференціальне рівняння їх руху по поверхні гребінки та встановлено залежність їх загальної швидкості від частоти обертання обчисувального барабану. Диференціальне рівняння, що запропоновано у цьому дослідженні використано для аналізу переміщення компонентів обчисаного вороху по поверхні гребінки пристрою в залежності від режимних параметрів обчисувального барабану жнивarki. В роботі [14] автори теоретично встановили вплив конструктивно-режимних параметрів на утворення повітряного потоку та максимальну швидкість в її області, що зумовило визначення раціональної форми кожуха та положення повітряної сітки для відведення легких домішок. Обробкою одержаних результатів чисельного моделювання процесів сепарації вороху в жниварці обчисувального типу із визначеною криволінійною формою кожуха та врахуванням фізико-механічних властивостей його компонентів встановлено, що значущими факторами процесу є такі конструктивно-режимні параметри: частота обертання бітера-відбивача n_1 і обчисувального барабану n_2 , положення прозорої зони границі L повітряної сітки кожуха та її ширина B . Авторами вирішена компромісна задача щодо максимізації частки відходу домішок δ_n і мінімізації втрат насіння і коробочок з насінням δ_s та теоретично одержані такі раціональні конструктивно-режимні параметри обчисувальної жнивarki: частота обертання бітера-відбивача $n_1 = 782 \text{ об/хв}$, частота обертання обчисувального барабана $n_2 = 671 \text{ об/хв}$, положення прозорої зони границь $L = 0,82 \text{ м}$ та її ширина $B = 0,45 \text{ м}$.

Виходячи з усього вищезазначеного, є підстави вважати, що для підтвердження та доповнення одержаних математичних моделей процесу збирання насіння льону олійного жнивarkою обчисувального типу методом обчисування рослин на корені є необхідність проведення подальших експериментальних досліджень у цьому напрямку.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є експериментальне обґрунтування конструктивно-режимних параметрів жнивarki обчисувального типу для збирання насіння льону олійного. Це надасть можливість створення більш ефективних технічних засобів збирання методом обчисування рослин на корені.

Для досягнення поставленої мети вирішувалася наступна задача:

- експериментально визначити раціональні параметри жнивarki обчисувального типу для збирання насіння льону олійного, що зумовлюють зменшення величини втрат при виконанні технологічного процесу.

Методичний підхід в проведенні досліджень

Для вивчення технологічного процесу обчисування рослин та визначення раціональних параметрів жнивarki обчисувального типу для збирання насіння льону олійного була розроблена експериментальна лабораторна установка [18]. Конструктивно-технологічна схема та загальний вид розробленої експериментальної установки для обчисування рослин представлена на рисунку 1.

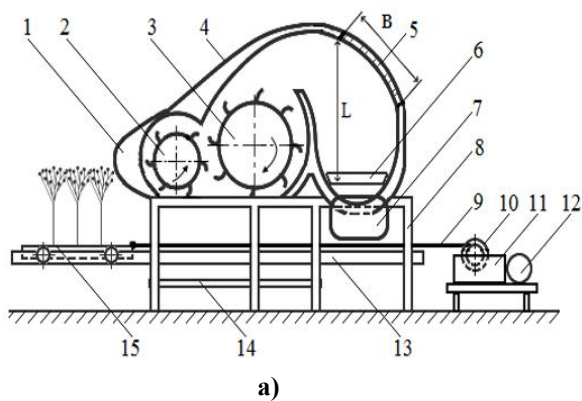


Рис. 1. Лабораторна установка для дослідження параметрів і режимів процесу обчисування сільськогосподарських культур [18]

а – конструктивна схема; б – загальний вигляд; 1 – обтікач; 2 – бітер-відбивач; 3 – обчисувальний барабан; 4 – верхній кожух; 5 – повітряна сітка; 6 – лоток для відбору обчисаного вороху; 7 – пульт керування; 8 – рама; 9 – гнучкий трос; 10 – барабан; 11 – коробка передач; 12 – електродвигун; 13 – напрямні рухомого поля; 14 – лоток для відбору втрат; 15 – рухоме поле

В процесі роботи експериментальної установки рослини льону олійного в першу чергу контактують з обтікачем 1, який сприяє приведенню їх у «стан обчисування» шляхом нахилу рослин вперед у напрямку руху, що дозволяє компенсувати ярусність рослин і здійснює підготовку стеблової маси до наступного етапу – контакту із обчисувальним барабаном 3. Імітація руху установки в напрямку рядків рослин льону олійного здійснюється за допомогою рухомого поля 15, швидкість якого може обиратися у відповідності до робочих швидкостей комбайна.

Після сходу із зовнішньої поверхні обтікача 1 рослини потрапляють в зону обчисування, де контактують з обчисувальним барабаном 3. Компоненти обчисаного вороху (насіння, коробочки з насінням, лущиння коробочок, часточки стебел, пиловидні домішки) під дією сил інерції та повітряного потоку, що утворюється бітером-відбивачем 2 та обчисувальним барабаном 3, по транспортуючому каналу переміщуються в зону лотка 6. Дрібні частинки вороху та пил видаляються за межі установки через повітряну сітку 5. Компоненти обчисаного вороху збираються в лоток 6 – цільова фракція та лоток 14 – втрати при роботі обчисувального пристрою.

Висота рослин відносно розташування обтікача встановлюється за допомогою затискачів на рухомому полі (рис.2,а). Частота обертання бітера-відбивача 2 та обчисувального барабана 3 здійснюється зміною передаточного числа приводу шляхом підбору приводних зірочок з різною кількістю зубців. Одна стінка установки виконана прозорою, що дозволило виконувати візуальне спостереження за процесом та реалізувати процес відео зйомки. Візуалізацією траєкторій руху компонентів обчисаного вороху (рис.2,б) встановлено, що частинки стебел, лущиння та пиловидні фракції мають більш похилу траєкторію руху у порівнянні із насінням льону олійного та коробочок з насінням, що зумовлює їх сегрегацію та видалення більш легких і дрібних компонентів через повітряну сітку кожуха 5.

Ретельне спостереження за процесом імітації обчисування рослин на експериментальній установці, починаючи від моменту взаємодії рослин з поверхнею обтікача, обчисування волоті и транспортування компонентів вороху по транспортуючому каналу під дією повітряного потоку, дозволило більш якісно оцінити процес збирання рослин за означеним методом.

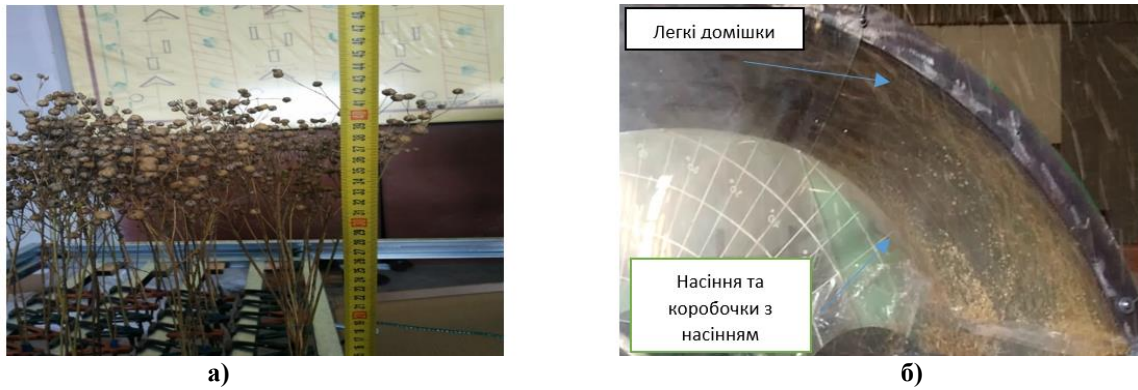


Рис. 2. Підготовка рослин та процес переміщення компонентів вороху у транспортуючому каналі:

а - підготовка рослин до обчісування; б - візуалізація руху компонентів обчісаного вороху

Дослідження процесу збирання насіння льону олійного на лабораторній установці для обчісування рослин проводилась за чотирма факторами: частоти обертання бітера-відбивача n_1 та обчісувального барабана n_2 , положення повітряної сітки L , ширина повітряної сітки B . Діапазони та рівні варіювання факторів представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Рівні варіацій факторами експериментальних досліджень

Рівні варіацій факторів	Фактори			
	Частота обертання бітера-відбивача n_1 , об/хв. (x_1)	Частота обертання очісувального барабана n_2 , об/хв. (x_2)	Положення повітряної сітки L , м (x_3)	Ширина повітряної сітки B , м (x_4)
Верхній рівень (+)	960	920	1	0,6
Основний рівень (0)	780	670	0,8	0,4
Нижній рівень (-)	600	180	0,6	0,2
Інтервал варіацій факторів	180	250	0,2	0,2

Експериментальні дослідження були проведені із застосуванням D-оптимального плану Бокса-Бенкіна другого порядку для 4 факторів із загальною кількістю дослідів – 27, повторність була прийнята триразова.

При визначенні складу компонентів та їх кількісних характеристик з обчісаного вороху відокремлювалися обчісане гребінками барабана експериментальної установки насіння льону олійного, необчісані коробочки з насінням, лущиння коробочок та часточки стебла рослин. Загальний вигляд компонентів обчісаного вороху льону олійного представлено на рисунку 3.

Критеріями оцінки процесу сепарації вороху в жниварці обчісувального типу було прийнято: масову частку відходу лущиння і часточок стебла з області жниварки δ_h , масову частку відходу насіння і коробочок із насінням з області жниварки δ_s і середню потужність P , що споживається експериментальною установкою. Середня потужність P визначалася за допомогою електролічильника, як відношення використаної електроенергії до часу роботи установки.

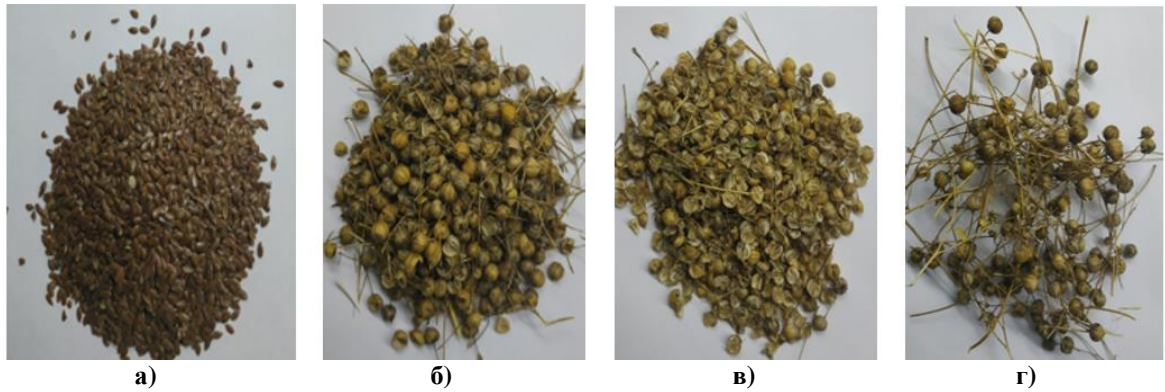


Рис. 3. Загальний вигляд компонентів обчисаного вороху льону олійного:
а – насіння; б – коробочки з насінням; в – лушпиння; г – часточки стебла

Результати досліджень

Для визначення раціональних конструктивно-режимних параметрів жнивarki обчисувального типу вирішимо компромісну задачу. Вона зводиться до максимізації масової частки відходу лушпиння і часточок стебла з області жнивarki δ_h та мінімізації частки відходу насіння і коробочок із насінням з області жнивarki δ_s , що зумовлює втрати цільової фракції при збиранні.

При проведенні експериментів для кожного досліду було розраховано масову частку відходу лушпиння і часточок стебла з області жнивarki δ_h та з використанням програмного пакету Wolfram Mathematica проведено апроксимацію отриманих даних, в результаті якої встановлено залежність від факторів досліджень у закодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \delta_h = & 41,5584 + 1,64012 x_1 + 0,886248 x_1^2 - 6,31347 x_2 - 1,00102 x_1 x_2 - \\ & - 1,76295 x_2^2 + 3,39003 x_3 + 0,534828 x_1 x_3 + 0,146541 x_2 x_3 - \\ & - 1,34309 x_3^2 + 8,52373 x_4 + 1,48706 x_1 x_4 - 2,7061 x_2 x_4 - \\ & - 0,387163 x_3 x_4 + 0,389504 x_4^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Проведена статистична обробка отриманого рівняння (1) зведена в таблицю 2.

Таблиця 2

Статистична обробка рівняння (1)

Коефіцієнт	Стандартна похибка	t-Критерій Стьюдента	Ймовірність помилки при відхиленні
a ₀₀	0,473608	87,7486	3,08864 · 10 ⁻⁹¹
a ₁₀	0,236804	6,92607	5,52276 · 10 ⁻¹⁰
a ₂₀	0,236804	-26,6612	2,43919 · 10 ⁻⁴⁵
a ₃₀	0,236804	14,3157	3,04199 · 10 ⁻²⁵
a ₄₀	0,236804	35,9949	2,16482 · 10 ⁻⁵⁶
a ₁₂	0,410157	-2,44058	0,0165579
a ₁₃	0,410157	1,30396	0,195465
a ₁₄	0,410157	3,6256	0,00047027
a ₂₃	0,410157	0,35728	0,721692
a ₂₄	0,410157	-6,59771	2,5226 · 10 ⁻⁹
a ₃₄	0,410157	-0,94394	0,347646
a ₁₁	0,355206	2,49503	0,0143585
a ₂₂	0,355206	-4,96317	3,12638 · 10 ⁻⁶
a ₃₃	0,355206	-3,78116	0,000275684
a ₄₄	0,355206	1,09656	0,275666

Аналіз таблиці 2 дозволяє скоротити незначущі коефіцієнти в рівнянні (1) і представити його у розкодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \delta_h = & -17,6018 + 60,7155 B + 9,73761 B^2 + 62,9574 L - 9,67908 B L - \\ & - 33,5772 L^2 - 0,0412674 n_1 + 0,0413073 B n_1 + 0,0148563 L n_1 + \\ & + 0,0000273533 n_1^2 + 0,0920035 n_2 - 0,0751693 B n_2 - \\ & - 0,0000308956 n_1 n_2 - 0,000054412 n_2^2. \end{aligned} \quad (2)$$

З врахуванням максимізації масової частки відходу лушпиння і часточок стебла з області жнивarki δ_h отримуємо раціональні параметри першого наближення:

$$\delta_h = 64,9 \%, n_1 = 960 \text{ об/хв.}, n_2 = 490 \text{ об/хв.}, L = 1 \text{ м.}, B = 0,6 \text{ м.} \quad (3)$$

Фіксуємо по чергово фактори досліджень на певному рівні згідно (3), побудовані на рисунку 4 графічні інтерпретації залежності (2).

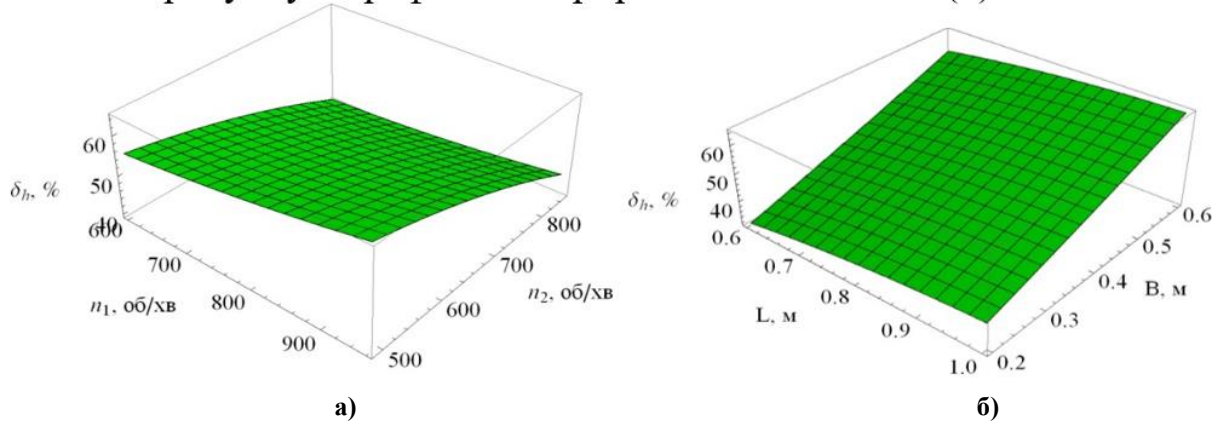


Рис. 4. Залежність масової частки відходу лушпиння і часточок стебла з області жнивarki δ_h :
а – від частоти обертання бітера-відбивача n_1 та обчисувального барабана n_2 ;
б – від положення повітряної сітки B та її ширини L при фіксованих значеннях (3)

Як видно з рисунка 4 із збільшенням частоти обертання n_1 , положення L і ширини B повітряної сітки масова частка відходу δ_s збільшується. В свою чергу із збільшенням частоти обертання n_2 масова частка відходу δ_h зменшується.

Для кожного варіанту дослідів було розраховано масову частку відходу насіння і коробочок із насінням з області жнивarki δ_s та з використанням програмного пакету Wolfram Mathematica проведено апроксимацію отриманих даних, в результаті якої встановлено залежність від факторів досліджень у закодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \delta_s = & 3,97364 - 1,283 x_1 + 1,13561 x_1^2 + 4,10254 x_2 - 0,246487 x_1 x_2 + \\ & + 8,6198 x_2^2 + 0,61405 x_3 + 0,167918 x_1 x_3 - 0,000607501 x_2 x_3 - \\ & - 0,0987031 x_3^2 - 1,32029 x_4 - 1,2141 x_1 x_4 - 2,0635 x_2 x_4 - \\ & - 0,158931 x_3 x_4 + 0,0344613 x_4^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Проведена статистична обробка отриманого рівняння (4) зведена в таблиці 3.

Аналіз таблиці 3 дозволяє скоротити незначущі коефіцієнти в рівнянні (4) і представити його у розкодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \delta_s = & 105,398 + 61,2868 B + 4,96947 L - 3,97328 B L - 2,46758 L^2 - \\ & - 0,0469495 n_1 - 0,033725 B n_1 + 0,00466438 L n_1 + \\ & + 0,0000350496 n_1^2 - 0,304844 n_2 - 0,0573195 B n_2 - \\ & - 7,60763 \cdot 10^{-6} n_1 n_2 + 0,000266043 n_2^2. \end{aligned} \quad (5)$$

З врахуванням мінімізації масової частки відходу насіння і коробочок із насінням з області жнивarki δ_s отримуємо раціональні параметри першого наближення:

$$\delta_s = 0,47 \%, n_1 = 960 \text{ об/хв.}, n_2 = 651 \text{ об/хв.}, L = 0,6 \text{ м.}, B = 0,6 \text{ м.} \quad (6)$$

Статистична обробка рівняння (4)

Коефіцієнт	Стандартна похибка	t-Критерій Стьюдента	Ймовірність помилки при відхиленні
a_{00}	0,174558	22,7619	$8,54305 \cdot 10^{-40}$
a_{10}	0,087279	-14,7007	$5,45187 \cdot 10^{-26}$
a_{20}	0,087279	47,0073	$1,30572 \cdot 10^{-66}$
a_{30}	0,087279	7,03639	$3,2994 \cdot 10^{-10}$
a_{40}	0,087279	-15,1256	$8,34494 \cdot 10^{-27}$
a_{12}	0,151172	-1,63073	0,106328
a_{13}	0,151172	1,11132	0,269296
a_{14}	0,151172	-8,03006	$2,93288 \cdot 10^{-12}$
a_{23}	0,151172	-0,00325929	0,997406
a_{24}	0,151172	-13,6517	$6,15735 \cdot 10^{-24}$
a_{34}	0,151172	-1,0533	0,294933
a_{11}	0,130919	8,67205	$1,3148 \cdot 10^{-13}$
a_{22}	0,130919	65,84	$8,07732 \cdot 10^{-80}$
a_{33}	0,130919	-0,752059	0,453915
a_{44}	0,130919	0,262781	0,793301

Фіксуючи по чергово фактори досліджень на певному рівні згідно (6), побудовані на рисунку 5 графічні інтерпретації залежності (5).

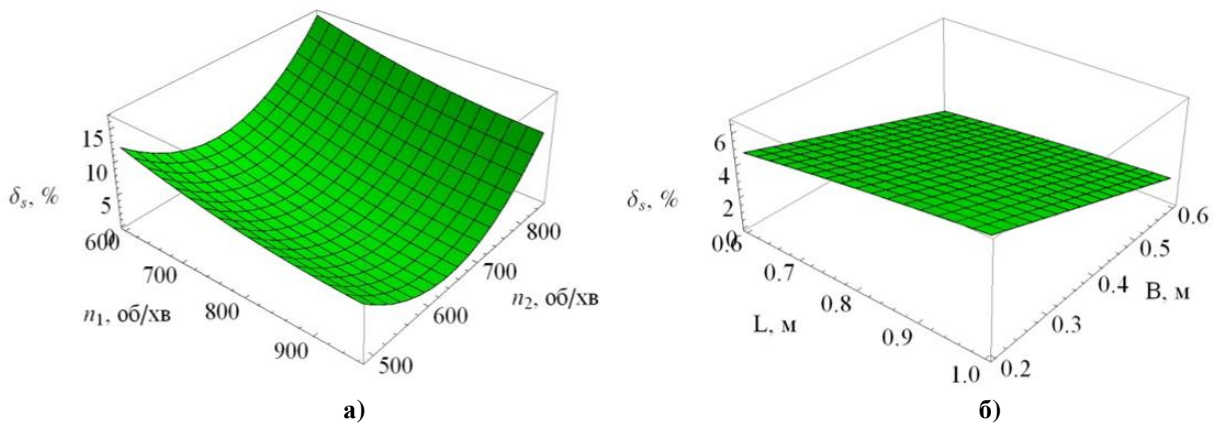


Рис. 5. Залежність масової частки відходу насіння і коробочок із насінням з області жнивarki δ_s :

а – від частоти обертання бігера-відбивача n_1 та обчисувального барабана n_2 ;

б – від положення повітряної сітки B та її ширини L при фіксованих значеннях (6)

Як видно з рисунку 5 із збільшенням частоти обертання n_1 і ширини повітряної сітки B , а також із зменшенням значення положення повітряної сітки L масова частка відходу δ_s зменшується. У свою чергу, для частоти обертання n_2 є оптимум ($n_2 = 651$ об/хв.), при якому масова частка відходу δ_s є мінімальною в заданому діапазоні факторів. Це дозволяє стверджувати про якісне протікання технологічного процесу обчисування рослин льону олійного при мінімальному відході із області жнивarki цільової фракції.

Для кожного варіанту досліду було визначено середню потужність, що споживається установкою P та з використанням програмного пакету Wolfram

Mathematica проведено апроксимацію отриманих даних, в результаті якої встановлено залежність від факторів досліджень у закодованому вигляді:

$$\begin{aligned}
 P = & 2,90832 + 0,144157 x_1 - 0,0578619 x_1^2 + 0,289464 x_2 - 0,05 x_1 x_2 - \\
 & - 0,0828869 x_2^2 - 0,0125 x_3 + 6,59195 \cdot 10^{-17} x_1 x_3 - 0,04375 x_2 x_3 - \\
 & - 0,0583333 x_3^2 - 0,229583 x_4 - 0,0125 x_1 x_4 - 0,0375 x_2 x_4 - \\
 & - 0,00625 x_3 x_4 - 0,00520833 x_4^2.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Проведена статистична обробка отриманого рівняння (7) зведена в таблицю 4.

Таблиця 4

Статистична обробка рівняння (7)

Коефіцієнт	Стандартна похибка	t-Критерій Стьюдента	Ймовірність помилки при відхиленні
a ₀₀	0,043587	66,7245	2,39512 · 10 ⁻⁸⁰
a ₁₀	0,0217935	6,61468	2,33345 · 10 ⁻⁹
a ₂₀	0,0217935	13,2821	3,3568910 ⁻²³
a ₃₀	0,0217935	-0,573565	0,567646
a ₄₀	0,0217935	-10,5345	1,52775 · 10 ⁻¹⁷
a ₁₂	0,0377475	-1,32459	0,188552
a ₁₃	0,0377475	1,74633 · 10 ⁻¹⁵	1
a ₁₄	0,0377475	-0,331148	0,741278
a ₂₃	0,0377475	-1,15902	0,249416
a ₂₄	0,0377475	-0,993444	0,323071
a ₃₄	0,0377475	-0,165574	0,868852
a ₁₁	0,0326903	-1,77	0,0800038
a ₂₂	0,0326903	-2,53552	0,0128964
a ₃₃	0,0326903	-1,78443	0,0776156
a ₄₄	0,0326903	-0,159324	0,873759

Аналіз таблиці 4 дозволяє скоротити незначущі коефіцієнти в рівнянні (7) і представити його у розкодованому вигляді:

$$\begin{aligned}
 \delta_s = & - 3,23992 - 0,45 B + 3,14757 L - 1,45833 L^2 + 0,00462077 n_1 - \\
 & - 1,78586 \cdot 10^{-6} n_1^2 + 0,00762877 n_2 - 0,00104167 B n_2 - \\
 & - 0,00121528 L n_2 - 1,54321 \cdot 10^{-6} n_1 n_2 - 2,55824 \cdot 10^{-6} n_2^2.
 \end{aligned} \tag{8}$$

З врахуванням мінімізації середньої потужності, що споживається установкою P отримуємо раціональні параметри першого наближення:

$$P = 1,98 \text{ Вт}, n_1 = 600 \text{ об/хв.}, n_2 = 490 \text{ об/хв.}, L = 0,6 \text{ м.}, B = 0,6 \text{ м.} \tag{9}$$

Фіксуючи по чергово фактори досліджень на певному рівні згідно (9), побудовані на рисунку 6 графічні інтерпретації залежності (8).

Як видно з рисунку 6 із збільшенням частоти обертання n_1 і n_2 , а також із зменшенням ширини повітряної сітки B середня потужність, що споживається установкою, P збільшується. В свою чергу положення повітряної сітки L практично не впливає на зазначений критерій досліджень.

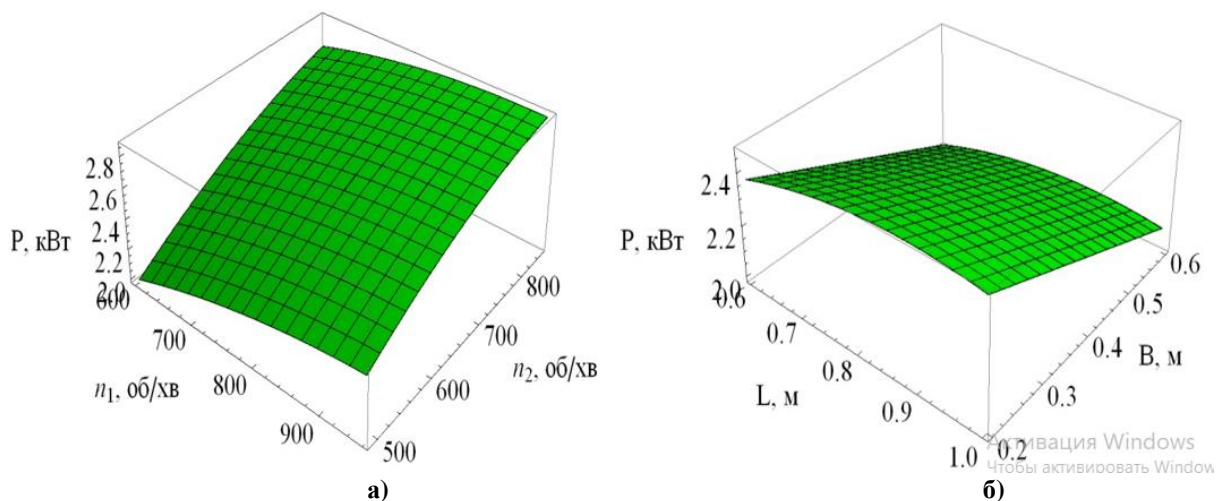


Рис. 6. Залежність середньої потужності, що споживається установкою P :
а – від частоти обертання бітера-відбивача n_1 та обчисувального барабана n_2 ;
б – від положення повітряної сітки B та її ширини L при фіксованих значеннях (9)

Вирішуючи компромісну задачу, а саме, максимізації масової частки відходу лушпиння і часточок стебла з області жнивarki δ_h , мінімізації частки відходу насіння і коробочок із насінням з області жнивarki δ_s і мінімізації споживаємої потужності P отримані раціональні конструктивно-технологічні параметри жнивarki обчисувального типу: частота обертання бітера-відбивача $n_1 = 892$ об/хв., частота обертання обчисувального барабана $n_2 = 652$ об/хв., положення повітряної сітки $L = 0,62$ м і її ширина $B = 0,56$ м. При цьому масова частка відходу лушпиння і часточок стебла з області жнивarki складає $\delta_h = 47,5$ %, частка відходу насіння і коробочок із насінням з області жнивarki, відповідно, складає $\delta_s = 2,1$ %, а потужність, що споживається експериментальною установкою, дорівнює $P = 2,7$ кВт.

Таким чином, одержані експериментальним шляхом раціональні значення конструктивно-режимних параметрів обчисувальної жнивarki забезпечують якісне виконання процесу обчисування рослин льону олійного при мінімальних втратах цільової фракції у вигляді насіння та коробочок із насінням δ_s та максимальному видаленні із області жнивarki механічних домішок у вигляді лушпиння коробочок та часточок стебла δ_h .

Обговорення результатів дослідження

Конструктивно-режимні параметри робочих органів жнивarki обчисувального типу в досліджуваному діапазоні варіації факторів суттєво впливають на масову частку відходу лушпиння і часточок стебла з області жнивarki δ_h , масову частку відходу насіння і коробочок із насінням з області жнивarki δ_s , що підтверджують результати попередніх теоретичних (7-11) і виконаних в даній роботі експериментальних досліджень.

Статистичний аналіз показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичними і експериментальними даними складає $0,88-0,95$, а відносна похибка оптимальних значень параметрів $4,6$ %. Наочне (рис.7-8) і статистичне порівняння теоретичних і експериментальних даних дає змогу стверджувати про адекватність математичної моделі, які розроблені в результаті теоретичних досліджень і можливість їх подальшого використання для інженерних розрахунків при створенні нових обчисувальних пристроїв.

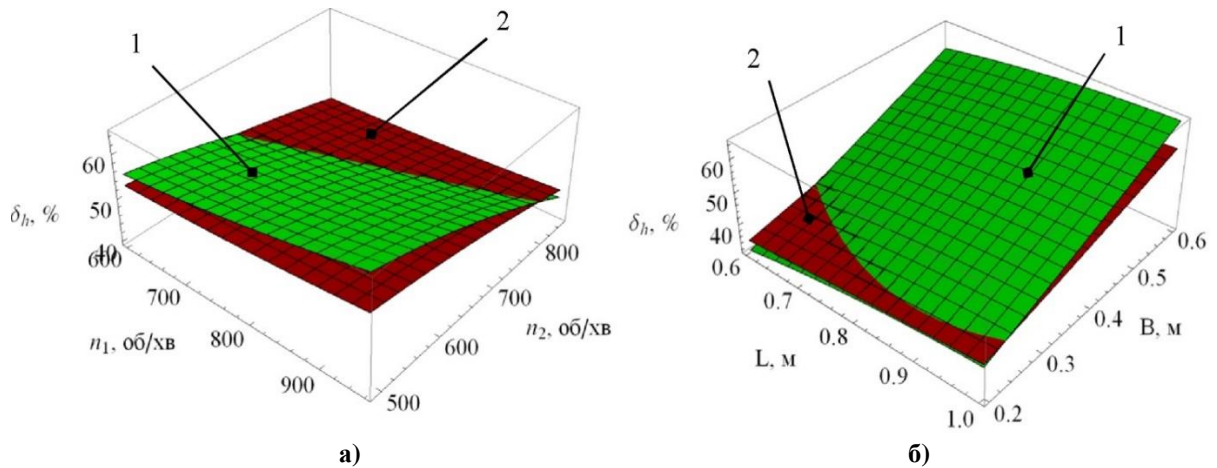


Рис. 7. Залежність масової частки відходу лушпиння і часточок стебла з області жнивarki δ_h :
а - від частоти обертання бітера-відбивача n_1 і обчисувального барабана n_2 ;
б - від положення повітряної сітки L і її ширини B ;
1 – теоретична; **2** експериментальна

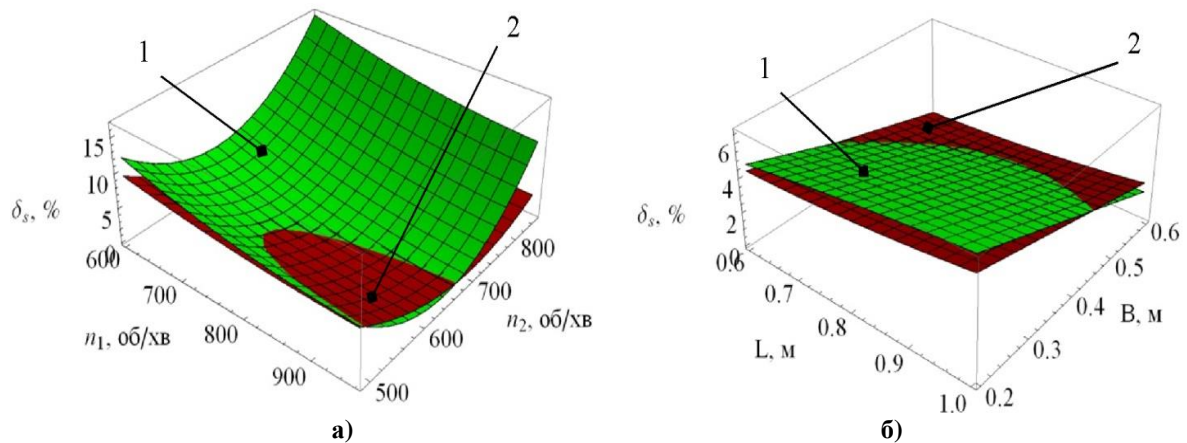


Рис. 8. Залежність масової частки відходу насіння і коробочок із насінням з області жнивarki δ_s :
а - від частоти обертання бітера-відбивача n_1 і обчисувального барабана n_2 ;
б - від положення повітряної сітки L та її ширини B ;
1 – теоретична; **2** - експериментальна

Таким чином, одержані результати дослідження вказують на те, що в обраному для вивчення діапазоні варіювання кількісних характеристик конструктивних параметрів і режимів функціонування робочих органів обчисувальної жнивarki спостерігається їх суттєвий вплив на масову частку відходу механічних домішок у вигляді лушпиння і часточок стебла рослин льону олійного δ_h та насіння і коробочок з насінням δ_s . Це дозволяє зробити висновок про якість виконання розробленої математичної моделі процесу та ефективність її застосування при створенні технічних засобів для збирання врожаю сільськогосподарських культур методом обчисування рослин на корені.

Висновки

1. В результаті експериментальних досліджень процесу сепарації вороху в жниварці обчисуючого типу встановлено залежності масової частки відходу лушпиння і часточок стебла з її області δ_h , частки відходу насіння і коробочок із насінням δ_s і

потужності P , що споживається установкою, від частоти обертання бітера-відбивача n_1 і обчисувального барабана n_2 , положення повітряної сітки L і її ширини B .

2. Вирішуючи компромісну задачу, а саме, максимізації масової частки відходу лушпиння і часточок стебла з області жнивarki δ_n , мінімізації частки відходу насіння і коробочок із насінням з області жнивarki δ_s та мінімізації споживаємої потужності P отримані раціональні конструктивно-режимні параметри жнивarki обчисувального типу: частота обертання бітера-відбивача $n_1 = 892$ об/хв., частота обертання обчисувального барабана $n_2 = 652$ об/хв., положення повітряної сітки $L = 0,62$ м і її ширина $B = 0,56$ м. При цьому масова частка відходу лушпиння і часточок стебла з області жнивarki складає $\delta_n = 47,5$ %, частка відходу насіння і коробочок із насінням з області жнивarki, відповідно, $\delta_s = 2,1$ %, а потужність, що споживається установкою, становить $P = 2,7$ кВт.

3. Статистичний аналіз показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичними і експериментальними даними складає $0,88-0,95$, відносна похибка оптимальних значень $4,6$ %. Наочне і статистичне порівняння теоретичних і експериментальних даних дає змогу стверджувати про адекватність математичних моделей, які розроблено в результаті теоретичних досліджень і можливість їх використання для інженерних розрахунків при створенні обчисувальних пристроїв для збирання сільськогосподарських культур.

Список використаних джерел

1. Погорельый Л.В., Коваль С.Н. Прогноз развития технологий и техники для уборки зерновых культур на первую четверть XXI века. // Перспективные технологии уборки зерновых культур, риса и семян трав: сб. док. междунар. науч.-технич. конф. – Мелитополь: ТГАТА, 2003. С. 17-21.

2. Сысолин П.В., Иваненко И. Проблемы и перспективы внедрения в Украине технологии уборки зерновых колосовых культур методом очесывания колосков. // Техника АПК. – 2008. - № 5. С.24–29.

3. Леженкин А.Н., Кравчук В.И., Кушнарев А.С. Технология уборки зерновых методом очеса растений на корню: состояние и перспективы. – Дослідницькое. – 2010. С. 40-44.

4. Yuan, J. Development of an Improved Cereal Stripping Harvester / J. Yuan, Y. Lan. Agricultural Engineering International: the CIGRE journal. Manuscript PM 07 009. Vol. IX. September, 2007. – Режим доступа: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.504.7187&rep=rep1&type=pdf> .

5. Чехов А.В., Лапа О.М., Міщенко Л.Ю., Полякова І.О. Льон олійний: біологія, сорти, технологія вирощування. К.: Українська академія аграрних наук, Інститут олійних культур, 2007. 59 с.

6. Сай В.А. Технологія вирощування, збирання та первинної переробки льону олійного. Луцьк: ЛНТУ, 2012. 168 с.

7. Шабанов П.А., Шабанов Н.П. Сравнительный анализ одно- и двухбарабанных очесывающих устройств на уборке зерновых культур. // Научные труды Украинского центра испытаний техники (УКРЦИТ). – Дослідницькое, 2004. 173с.

8. Шабанов П.А. Механико- технологические основы обмолота зерновых культур на корню: дис. докт. техн. наук: спец. 05.20.01 / П. А. Шабанов. – Мелитополь, 1988. 308 с.

9. Голубев И.К. Обоснование основных параметров и режимов работы двухбарабанного устройства для очесывания риса на корню: дис. ... канд. Техн. наук: спец. 05.20.01 / И. К. Голубев. – М., 1989. 201с.

10. Козаченко О. В., Дьяконов С. О., Пахучий А. М. Обґрунтування форми обтікача обчисувальної жнивarki для збирання льону олійного. Механізація та автоматизація виробничих процесів. Вип. 5 (33). Суми. 2018. С. 48-52.
11. Козаченко О.В., Дьяконов С.О., Гончаров В.В., Пахучий А.М. Дослідження режимних параметрів обчисувального барабану жнивarki. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків: ХНТУСГ. 2019. Вип.199. С.388-396.
12. Kozachenko O., Pahuchiy A. Modeling of interaction with plants linseed occurance drum. ТЕКА. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. Lublin-Rzeszow, 2019. Vol. 19. No 1. pp. 59-64.
13. Козаченко О. В., Пахучий А. М., Дьяконов С.О., Гончаров В.В. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обчисувального барабану жнивarki. Інженерія природокористування. 2019. Вип. 1 (11). С. 75-85.
14. Kozachenko O., Pakhuchiy A., Shkregal O., Dyakonov S., Bleznyuk O. Kadenko V. Results of numerical modeling of the process of harvesting the seeds of flax by a harvester of the stripping type. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2019 - 3(1-99). - с. 66-74.
15. Bai C., Gosman A. D. Development of methodology for spray impingement simulation. SAE Technical Paper Series. 1995. 21 p.
16. Wallin S. Engineering turbulence modeling for CFD with a focus on explicit algebraic Reynolds stress models. Doctoral thesis. Norstedts truckeri, Stockholm, Sweden. 2000. 124 p.
17. Aliev E.B., Bandura V.M., Pryshliak V.M., Yaropud V.M., Trukhanska O.O. Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry / E.B. Aliev, // INMATEH – Agricultural Engineering – Vol. 54, No. 1, 2018. P. 95-104.
18. Лабораторна установка для дослідження параметрів і режимів процесу обчисування сільськогосподарських культур: пат. 135514 U Україна: МПК А01Д 41/00. № u 201811954; заявл. 03.12.18. опубл 10.07.2019, Бюл № 13.

References

1. Pogorelyiy L.V., Koval S.N. Prognoz razvitiya tehnologiy i tehniki dlya uborki zernovyih kultur na pervuyu chetvert XXI veka. // Perspektivnyie tehnologii uborki zernovyih kultur, risa i semyan trav: sb. dok. mejdunar. nauch.-tehnic. konf. – Melitopol: TGATA, 2003. S. 17-21.
2. Syisolin P.V., Ivanenko I. Problemyi i perspektivyi vnedreniya v Ukraine tehnologii uborki zernovyih kolosovyih kultur metodom ochesyivaniya koloskov. // Tehnika APK. – 2008. - № 5. S.24–29.
3. Lejenkin A.N., Kravchuk V.I., Kushnarev A.S. Tehnologiya uborki zernovyih metodom ochesa rasteniy na kornyu: sostoyanie i perspektivy. – Doslidnitskoe. – 2010. S. 40-44.
4. Yuan, J. Development of an Improved Cereal Stripping Harvester / J. Yuan, Y. Lan. Agricultural Engineering International: the CIGRE journal. Manuscript PM 07 009. Vol. IX. September, 2007. – Rejim dostupa: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.504.7187&rep=rep1&ty=pdf>.
5. Chehov A.V., Lapa O.M., Mischenko L.Y., Polyakova I.O. Lon oliyniy: biologiya, sorti, tehnologiya viroschuvannya. K.: Ukrainska akademiya agrarnih nauk, Institut oliynih kultur, 2007. 59 s.
6. Say V.A. Tehnologiya viroschuvannya, zbirannya ta pervinnoi pererobki lonu

oliynogo. Lutsk: LNTU, 2012. 168 s.

7. Shabanov P. A., Shabanov N. P. Sravnitelnyiy analiz odno- i dvuhbarabannyih ochesyivayuschih ustroystv na uborke zernovyih kultur. // Nauchnyie trudyi Ukrainskogo tsentra ispytaniy tehniki (UKRTSIT). – Doslidnitskoe, 2004. 173s.

8. Shabanov P.A. Mehaniko- tehnologicheskie osnovyi obmolota zernovyih kultur na kornyu: dis. dokt. tehn. nauk: spets. 05.20.01 / P. A. Shabanov. – Melitopol, 1988. 308 s.

9. Golubev I.K. Obosnovanie osnovnyih parametrov i rejimov raboty dvuhbarabannogo ustroystva dlya ochesyivaniya risa na kornyu: dis. ... kand. tehn. nauk: spets. 05.20.01 / I. K. Golubev. – M., 1989. 201s.

10. Kozachenko O. V., Dyakonov S. O., Pahuchiy A. M. Obgruntuvannya formi obtikacha obchisuvalnoï jnivarki dlya zbirannya lonu oliynogo. Mehanizatsiya ta avtomatizatsiya virobnichih protsesiv. Vip. 5 (33). Sumi. 2018. S. 48-52.

11. Kozachenko O.V., Dyakonov S.O., Goncharov V.V., Pahuchiy A.M. Doslidjennya rejimnih parametrov obchisuvalnogo barabanu jnivarki. Visnik Harkivskogo natsionalnogo tehničnogo universitetu silskogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka. Harkiv: HNTUSG. 2019. Vip.199. S.388-396.

12. Kozachenko O., Pahuchiy A. Modeling of interaction with plants linseed occupancy drum. TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. Lublin-Rzeszow, 2019. Vol. 19. No 1. pp. 59-64.

13. Kozachenko O. V., Pahuchiy A. M., Dyakonov S.O., Goncharov V.V. Obruntuvannya konstruktivno-tehnologichnih parametrov obchisuvalnogo barabanu jnivarki. Injeneriya prirodokoristuvannya. 2019. Vip. 1 (11). S. 75-85.

14. Kozachenko O. Pakhuchiy A., Shkregal O., Dyakonov S., Bleznyuk O., Kadenko V. Results of numerical modeling of the process of harvesting the seeds of flax by a harvester of the stripping type. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2019 - 3(1-99). - s. 66-74.

15. Bai C., Gosman A. D. Development of methodology for spray impingement simulation. SAE Technical Paper Series. 1995. 21 p.

16. Wallin S. Engineering turbulence modeling for CFD with a focus on explicit algebraic Reynoldce stress models. Doctoral thesis. Norstedts truckeri, Stockholm, Sweden. 2000. 124 p.

17. Aliev E.B. Bandura, V.M. Pryshliak, V.M. Yaropud, O.O. Trukhanska Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. // INMATEH – Agricultural Engineering – Vol. 54, No. 1, 2018. P. 95-104.

18. Laboratorna ustanovka dlya doslidjennya parametrov i rejimiv protsesu obchisuvannya silskogospodarskih kultur: pat. 135514 U Ukraïna: MPK A01D 41/00. № u 201811954; zayavl. 03.12.18. opubl 10.07.2019, Byul № 13.