

**Алієв Е. Б.**

д.т.н., старший дослідник

Дудін В.Ю.

к.т.н., доцент

Безверхній П.Є.

к.т.н., доцент

*Дніпровський державний
аграрно-економічний
університет***Шаповал О. М.**

засновник

**ТОВ «НВП» СОЮЗ-
КОМПОЗИТ»****Aliiev E**Doctor of Technical Sciences,
senior researcher**Dudin V.**

Ph.D., associate professor

Bezverkhniy P.

postgraduate student

*Dnipro State Agrarian and
Economic University***Shapoval O.**

Founder

**ТОВ «NVP» SOYUZ-
КОМПОЗИТ»****УДК 631.331.5****DOI: 10.37128/2306-8744-2024-2-5**

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗАСПОКОЮВАЧА НАСІННЯ ВИСІВНОЇ СЕКЦІЇ ПНЕВМАТИЧНОЇ СІВАЛКИ

Проблему вильоту насіння з борозенки під час посіву сівалкою John Deere 90 Series можна вирішити шляхом встановлення заспокоювача насіння. Однак заводські заспокоювачі швидко зношуються після обробки 500–600 гектарів. Це вказує на необхідність вдосконалення конструкції та вибору матеріалу заспокоювачів для забезпечення їх довговічності. Подальші дослідження та випробування допоможуть знайти оптимальні рішення для зменшення зносу і підвищення ефективності роботи заспокоювачів насіння.

Метою є проведення чисельного моделювання та лабораторних досліджень коливань заспокоювача насіння висівної секції пневматичної сівалки John Deere 90 Series і обґрунтування його конструктивних параметрів та проведення підбору матеріалу.

З використанням програмного пакету Simcenter STAR-CCM+ проведено симуляцію процесу коливання заспокоювача насіння, який знаходиться між прикочувальним колесом і ґрунтом. В результаті симуляції було визначено розподіл абсолютної деформації сповільнювача Δu_f і напруженості σ_f , що виникає в кожній комірі створеної сітки заспокоювача. Отримані залежності максимального значення напруженості σ_{fmax} і коефіцієнта запасу міцності k_f від товщини заспокоювача T_f , висоти п'яти H_f і відстані її розміщення відносно вільного кінця заспокоювача L_f для різних матеріалів (Nylon, ABS, TPU).

Розв'язуючи багатокритеріальну задачу оптимізації, яка зводиться до одночасного пошуку оптимальних значень двох критеріїв, отримані значення геометричних параметрів заспокоювача насіння: $T_f = 6,5$ мм, $H_f = 12,4$ мм, $L_f = 14,6$ мм.

За результатами лабораторних досліджень встановлено, що за матеріал заспокоювача слід обрати TPU, оскільки для його згину необхідно прикласти найменшу силу (827 Н). Це підтверджується меншим коефіцієнтом запасу міцності k_f .

Ключові слова: насіння, точний висів, пневматична сівалка, заспокоювач насіння, коливання, симуляція, матеріал, параметри, запас міцності.

Вступ. На сьогодні для посіву сільськогосподарських культур достатньо широке застосування в Україні знайшли пневматичні сівалки точного висіву виробництва John Deere [1]. Конструктивні

особливості таких сівалок безпосередньо залежать від фізико-механічних властивостей ґрунтів, для яких вони призначені. Наприклад, сівалки John Deere 90 Series спеціально розроблені для піщаних ґрунтів, що є достатньо



м'якими. Завдяки цьому висока швидкість руху насіння через насіннепровід за допомогою швидкого повітряного потоку (до 20 м/с) не призводить до пошкодження насіння та його викидання з борозенки під час посіву [2]. Однак, при використанні цих сівалок на чорноземних ґрунтах України виникають проблеми травмування насіння та його викидання з борозенки, що негативно впливає на урожайність і призводить до зниження прибутку [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблема вильоту насіння з дна борозенки вирішується шляхом встановлення заспокоювача насіння [4–6]. Однак, заводські заспокоювачі виробництва John Deere при роботі в умовах українського степу на чорноземних ґрунтах швидко втрачають першочергову форму, пошкоджуються і зношуються.

У результаті проведених польових експериментальних досліджень висівної секції пневматичної сівалки точного висіву John Deere 90 Series з використанням екшн-камери були зроблені фотографії моменту вилітання насіння з посівного ложа для різних конструкцій заспокоювачів насіння [3–4]. Найефективнішою конструкцією виявився заспокоювач насіння довжиною 181 мм [7]. Однак, через недосконалу конструкцію та необґрунтований вибір матеріалу, цей заспокоювач швидко зношується після посіву 500–600 гектарів угідь. Це означає, що необхідно вдосконалити конструкцію та провести підбір матеріалу для заспокоювачів насіння, щоб забезпечити їх довговічність та ефективність. Подальші дослідження та випробування можуть допомогти знайти оптимальні рішення, що дозволить зменшити знос і підвищити ефективність роботи сівалки.

Попередній аналітичний аналіз роботи заспокоювача насіння [8] дозволив розрахувати тривимірну модель робочої поверхні (рис. 1).

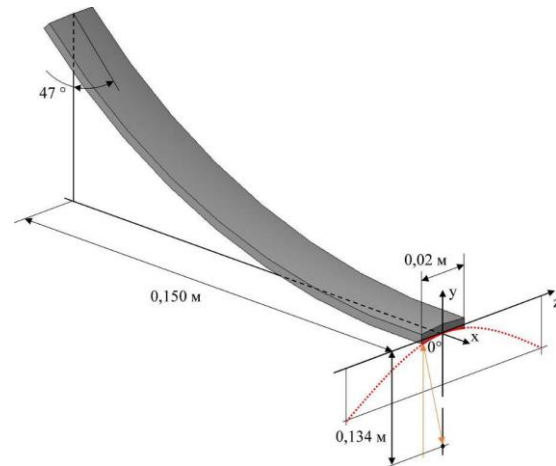


Рис. 1. Розрахована тривимірна модель робочої поверхні заспокоювача насіння [8]

Мета та завдання дослідження.

Провести чисельне моделювання та лабораторні дослідження коливань заспокоювача насіння висівної секції пневматичної сівалки John Deere 90 Series і обґрунтувати його конструктивні параметри та провести підбір матеріалу.

Викладення основного матеріалу.

Заспокоювач насіння одним кінцем жорстко закріплений до висівного башмака, а інший знаходиться між прикочувальним колесом і ґрунтом. Через нерівність поверхні ґрунту відбувається постійне коливання висівної секції, що приводить до взаємодії заспокоювача насіння із поверхнями прикочувального колеса і ґрунту. Тому на вільному кінці заспокоювача додано отвір, що дозволяє під час руху сівалки пропускати насіння, які знаходяться на поверхні ґрунту, та п'яту, що забезпечує рівномірну дію прикочувального колеса (рис. 2). Згідно з дослідженнями [9–12] середнє значення амплітуда коливань сівалки у вертикальному напрямку складає $\pm 0,03$ м, а частоти – 2 Гц.

З використанням програмного пакету Simcenter STAR-CCM+ [13] проведемо симуляцію процесу коливання заспокоювача насіння, який знаходиться між прикочувальним колесом і ґрунтом. Розрахункова схема наведена на рис. 2.

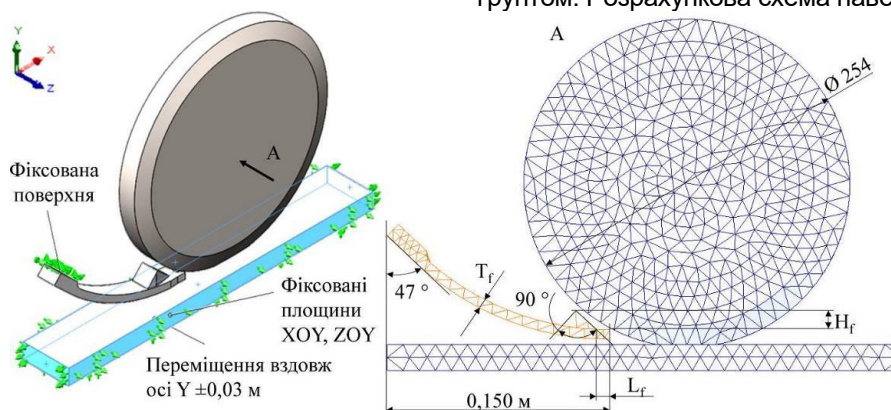


Рис. 2. Розрахункова схема симуляції коливань заспокоювача насіння



У ролі сіткових моделей обрано генератор поверхневої і тетраедральної сіток із базовим розміром комірки – 0,01 м. У ролі фізичних моделей обрано тривимірну кінцево-елементну модель аналізу напружень в суцільному твердому тілі, ізотропну лінійну модуль пружності, модель пластичності J2.

За спрощення було прийнято відсутність деформацій для прикочувального колеса і ґрунту. Тобто в результаті коливань сівалки (переміщення вздовж осі Y) деформується лише заспокоювач насіння через контактну взаємодію відповідних поверхонь.

Факторами досліджень обрано:

- товщину заспокоювача T_f , яка

змінювалась в межах від 5 мм до 8 мм із кроком 1,5 мм;

- висоту п'яти заспокоювача H_f , яка змінювалась в межах від 5 мм до 15 мм із кроком 10 мм;

- розміщення п'яти відносно вільного кінця заспокоювача L_f , яка змінювалась в межах від 5 мм до 15 мм із кроком 10 мм.

У ролі матеріалу було використано ABS, поліамід 6 (Nylon) і термопластичний поліуретан (TPU) виробництва monofilament.com.ua.

Прийняті фізико-механічні властивості зазначених матеріалів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

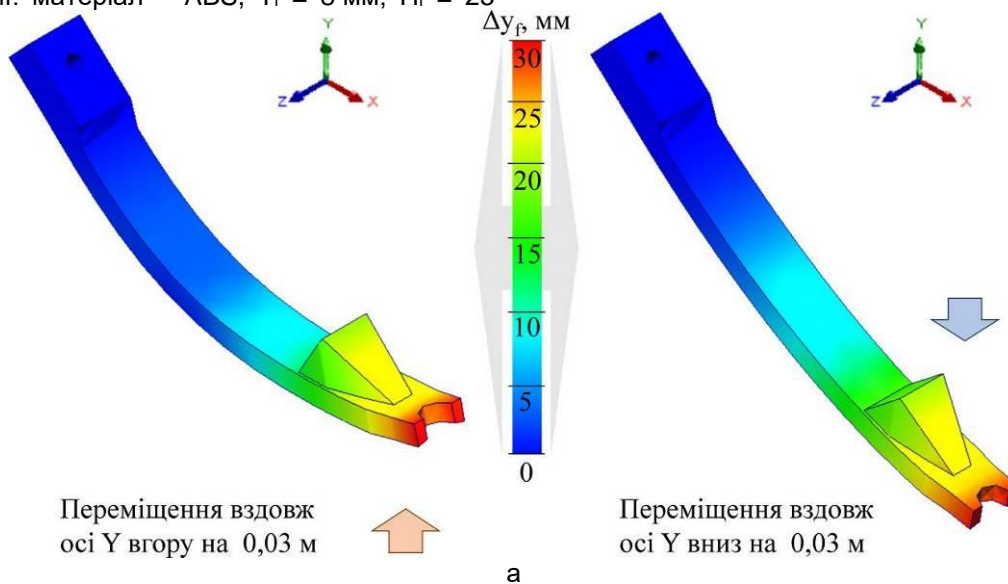
Фізико-механічні властивості матеріалів заспокоювача насіння

Показник	Nylon	ABS	TPU
Модуль пружності, МПа	2400	2900	94
Коефіцієнт Пуассона	0,387	0,389	0,410
Модуль зсуву, МПа	817	318	29
Густина, кг/м ³	1150	1070	900
Межа міцності при розтягуванні, МПа	75	41	38
Межа плинності, МПа	62	29	9

У результаті симуляції було визначено розподіл абсолютної деформації сповільнювача Δu_f і напруженості σ_f , що виникає в кожній комірці створеної сітки (рис. 3).

На рис 3 наведено один із варіантів симуляції: матеріал – ABS, $T_f = 8$ мм, $H_f = 25$

мм, $L_f = 25$ мм. З рисунку видно, що при відносному переміщенні вгору найбільша напруженість спостерігається на вільному кінці сповільнювача (49,7 МПа) і в середині (48,3 МПа).



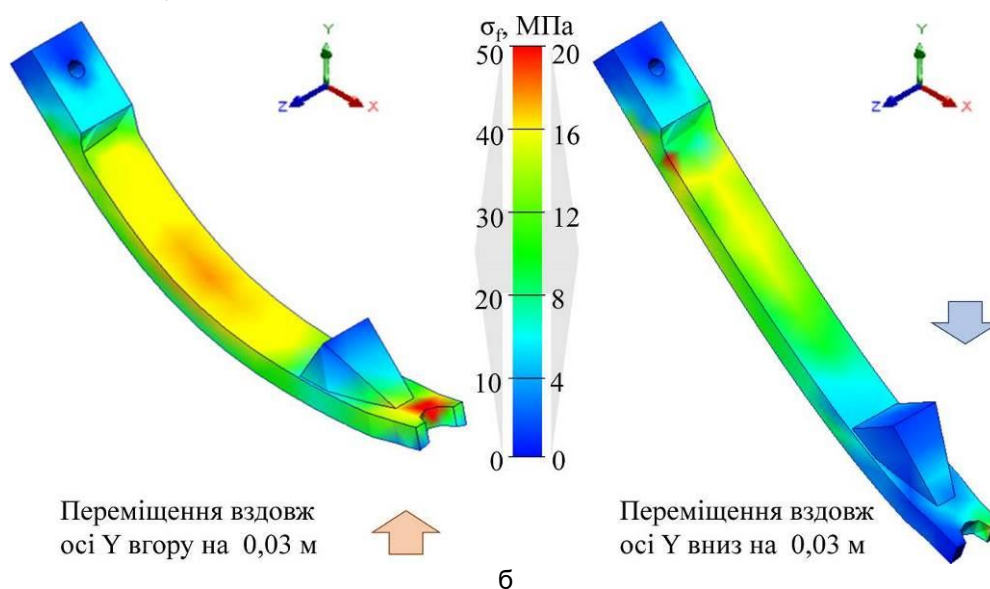
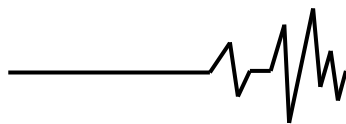


Рис. 2. Розподіл абсолютної деформації Δu_f (а) і напруженості σ_f (б) заспокоювача для варіанту симуляції: матеріал – ABS, $T_f = 8$ мм, $H_f = 25$ мм, $L_f = 25$ мм

Для переміщення вниз найбільша напруженість спостерігається на закріпленому кінці словільювача (18,4 МПа). Для інших варіантів симуляції характер розподілу зберігається, відмінність лише у значеннях напруженості.

Враховуючи прийнятну частоту коливань – 2 Гц, загальний ресурс сівалки John Deere 90 Series до технічного обслуговування – 6000 га [14], швидкість руху – 2 м/с, відстань між сошниками – 0,19 м і їх кількість – 24 од., маємо загальну кількість коливань заспокоювача – $2 \text{ Гц} \times 6000 \text{ га} \times 10000 \text{ м}^2/\text{га} / 0,19 \text{ м} / 24 \text{ од.} /$

$2 \text{ м/с} = 13157894 \text{ шт.}$

Для аналізу втоми заспокоювача при циклічних коливаннях отримано розподіл частки пошкоджень і терміну служби (рис. 3). Представлена епюра показує відсоток довговічності конструкції, витраченої певними подіями втоми матеріалу. Коефіцієнт пошкодження 100 % і вище означає, що протягом заданого періоду дії навантаження очікується руйнування деталі. Термін служби показує кількість циклів, які спричиняють руйнування заспокоювача в кожному місцеположенні.

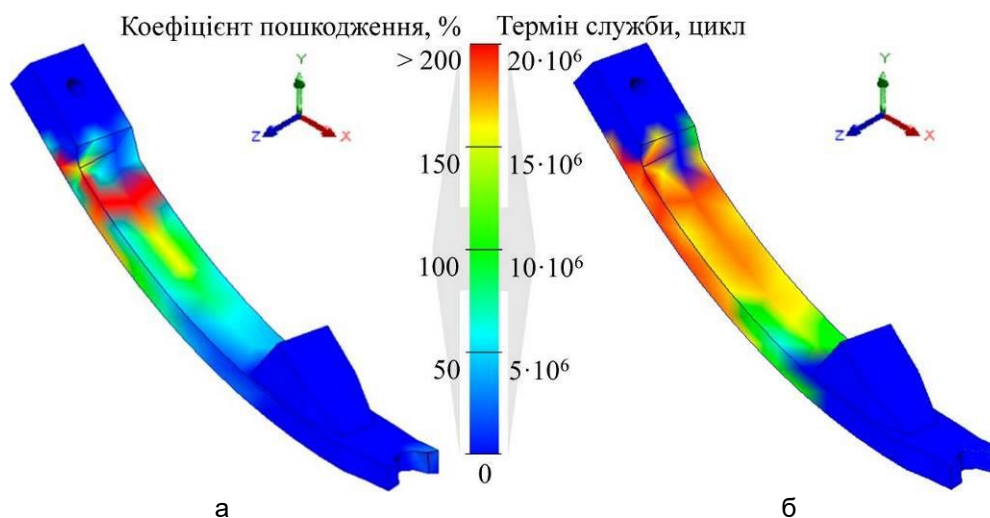
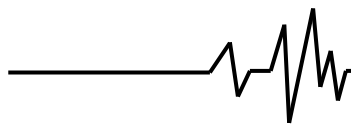


Рис. 3. Епюра коефіцієнта пошкоджень (а) і терміну служби (б) заспокоювача для варіанту симуляції: матеріал – ABS, $T_f = 8$ мм, $H_f = 25$ мм, $L_f = 25$ мм

Як видно з рис. 3, заспокоювач містить проблемні зони, які позначено червоним. У цих зонах ймовірно руйнування деталі при великій

кількості циклів коливань.

Тому надалі необхідно обґрунтувати раціональні параметри заспокоювача для



забезпечення мінімізації максимального значення напруженості σ_{fmax} (рис. 3, б) і максимізації коефіцієнта запасу міцності k_f , який розраховується як відношення граничного напруження (граничного навантаження) до розрахункового напруження (розрахункового навантаження). Програмний пакет Simcenter STAR-CCM+ визначає зазначені показники в

автоматичному режимі.

За результатами чисельного моделювання і обробки отриманих даних в програмному пакеті Wolfram Cloud отримано рівняння регресії другого порядку $\sigma_{fmax}(T_f, H_f, L_f)$ в закодованому вигляді – для Nylon:

$$\sigma_{fmax} = 11,3942 - 4,43946 x_1 + 2,43694 x_1^2 + 1,84473 x_2 - 0,509607 x_1 x_2 + 1,66106 x_2^2 - 1,79665 x_3 + 0,902313 x_1 x_3 - 1,88964 x_2 x_3 + 2,31092 x_3^2; \quad (1)$$

– для ABS:

$$\sigma_{fmax} = 21,7119 - 7,81804 x_1 + 3,99509 x_1^2 + 3,34087 x_2 - 1,3159 x_1 x_2 + 1,14349 x_2^2 - 3,29944 x_3 + 1,43308 x_1 x_3 - 3,01605 x_2 x_3 + 3,90124 x_3^2; \quad (2)$$

– для TPU:

$$\sigma_{fmax} = 4,70992 - 1,68826 x_1 + 0,633499 x_1^2 + 0,809823 x_2 - 0,326359 x_1 x_2 + 0,668287 x_2^2 - 0,849115 x_3 + 0,52116 x_1 x_3 - 0,649752 x_2 x_3 + 0,533441 x_3^2. \quad (3)$$

Статистична обробка даних отриманого рівнянь (1)–(3) наведена в табл. 2.

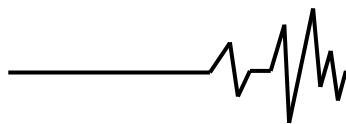
Таблиця 2

Статистична обробка отриманих рівнянь (1)–(3)

Коефіцієнт	Значення	Похибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значимості
Nylon (1)				
a ₀₀	11,3942	0,508739	22,397	1,08653·10 ⁻²⁸
a ₁₀	-4,43946	0,303229	-14,6406	2,8811·10 ⁻²⁰
a ₂₀	1,84473	0,247585	7,45088	8,48823·10 ⁻¹⁰
a ₃₀	-1,79665	0,247585	-7,25672	1,74194·10 ⁻⁹
a ₁₂	-0,509607	0,371378	-1,37221	0,175779
a ₁₃	0,902313	0,371378	2,42964	0,0185353
a ₂₃	-1,88964	0,303229	-6,23174	7,72853·10 ⁻⁸
a ₁₁	2,43694	0,525207	4,63995	0,0000232475
a ₂₂	1,66106	0,42883	3,87347	0,000296886
a ₃₃	2,31092	0,42883	5,38889	1,66518·10 ⁻⁶
ABS (2)				
a ₀₀	21,7119	0,841521	25,8008	1,11913·10 ⁻³¹
a ₁₀	-7,81804	0,50158	-15,5868	1,92726·10 ⁻²¹
a ₂₀	3,34087	0,409538	8,15764	6,27182·10 ⁻¹¹
a ₃₀	-3,29944	0,409538	-8,0565	9,09159·10 ⁻¹¹
a ₁₂	-1,3159	0,614307	-2,14209	0,0367996
a ₁₃	1,43308	0,614307	2,33284	0,0234849
a ₂₃	-3,01605	0,50158	-6,0131	1,7257·10 ⁻⁷
a ₁₁	3,99509	0,868762	4,59861	0,0000267915
a ₂₂	1,14349	0,709341	1,61205	0,112892
a ₃₃	3,90124	0,709341	5,49981	1,11712·10 ⁻⁶
TPU (3)				
a ₀₀	4,70992	0,24971	18,8615	3,59935·10 ⁻²⁵
a ₁₀	-1,68826	0,148837	-11,343	8,55366·10 ⁻¹⁶
a ₂₀	0,809823	0,121525	6,66383	1,56697·10 ⁻⁸
a ₃₀	-0,849115	0,121525	-6,98715	4,73007·10 ⁻⁹
a ₁₂	-0,326359	0,182288	-1,79035	0,0791098
a ₁₃	0,52116	0,182288	2,859	0,00606401
a ₂₃	-0,649752	0,148837	-4,36552	0,0000590963
a ₁₁	0,633499	0,257794	2,45739	0,0173009
a ₂₂	0,668287	0,210488	3,17494	0,00249702
a ₃₃	0,533441	0,210488	2,53431	0,0142572

В розкодованому вигляді без урахуванням незначущих коефіцієнтів за t-критерієм Стьюдента (> t_{0,05}(63) = 2,00):

– для Nylon:



$$\sigma_{fmax} = 86,8704 - 0,0303996 H_f + 0,01661 H_f^2 - 0,980498 L_f - 0,018896 H_f L_f + 0,0231092 L_f^2 - 17,942 T_f + 0,0601542 L_f T_f + 1,08308 T_f^2; \quad (4)$$

– для ABS:

$$\sigma_{fmax} = 144,427 + 0,443447 H_f + 0,0114349 H_f^2 - 1,66891 L_f - 0,0301605 H_f L_f + 0,0390124 L_f^2 - 29,7279 T_f + 0,0955389 L_f T_f + 1,7756 T_f^2; \quad (5)$$

– для TPU:

$$\sigma_{fmax} = 28,6099 - 0,02204 H_f + 0,0066828 H_f^2 - 0,373317 L_f - 0,0064975 H_f L_f + 0,00533441 L_f^2 - 5,30688 T_f + 0,034744 L_f T_f + 0,281555 T_f^2. \quad (6)$$

Побудувавши тривимірний графік рівняння (4)–(6) на рис. 4 бачимо, що із збільшенням товщини заспокоювача T_f , зменшенням висоти п'яти H_f і збільшенням відстані її розміщення відносно вільного кінця

заспокоювача L_f спостерігається зменшення максимального значення напруженості σ_{fmax} . Також з рисунку наочно видно, що напруженість σ_{fmax} є більшою для ABS, а меншою для TPU.

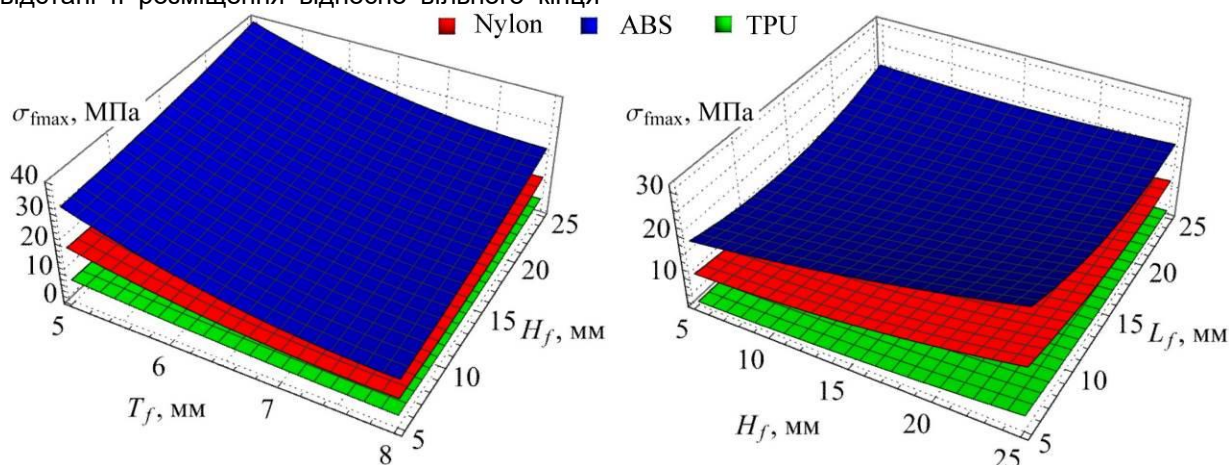


Рис. 4. Залежність максимального значення напруженості σ_{fmax} від товщини заспокоювача T_f , висоти п'яти H_f і відстані її розміщення відносно вільного кінця заспокоювача L_f для різних матеріалів

Перевірка отриманих рівнянь (4)–(6) за коефіцієнтом кореляції Пірсона $r = 0,87$ дає змогу стверджувати про їхню адекватність на досліджуваному діапазоні варіювання факторів.

За результатами чисельного моделювання і обробки даних в програмному пакеті Wolfram Cloud отримано рівняння регресії другого порядку k_f (T_f , H_f , L_f) в закодованому вигляді:

За результатами чисельного

$$k_f = 2,04613 + 0,526045 x_1 - 0,417 x_1^2 - 0,205367 x_2 - 0,0402536 x_1 x_2 - 0,0939857 x_2^2 + 0,13751 x_3 - 0,0207107 x_1 x_3 + 0,174229 x_2 x_3 - 0,129986 x_3^2; \quad (7)$$

– для ABS:

$$k_f = 1,61442 + 0,452818 x_1 - 0,237339 x_1^2 - 0,164802 x_2 - 0,00155893 x_1 x_2 - 0,166612 x_2^2 + 0,111898 x_3 - 0,0367982 x_1 x_3 + 0,0935964 x_2 x_3 - 0,131755 x_3^2; \quad (8)$$

– для TPU:

$$k_f = 2,82432 + 0,770971 x_1 - 0,440369 x_1^2 - 0,286019 x_2 - 0,0513643 x_1 x_2 - 0,118686 x_2^2 + 0,230233 x_3 - 0,0426179 x_1 x_3 + 0,275136 x_2 x_3 - 0,201614 x_3^2. \quad (9)$$

Статистична обробка даних отриманого рівнянь (7)–(9) наведена в табл. 3.

Таблиця 3

Статистична обробка отриманих рівнянь (7)–(9)

Коефіцієнт	Значення	Похибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значимості
Nylon (7)				
a_{00}	2,04613	0,0443353	46,1514	$1,78466 \cdot 10^{-44}$
a_{10}	0,526045	0,0264256	19,9067	$2,92204 \cdot 10^{-26}$
a_{20}	-0,205367	0,0215764	-9,51812	$4,5964 \cdot 10^{-13}$
a_{30}	0,13751	0,0215764	6,37315	$4,58897 \cdot 10^{-8}$
a_{12}	-0,0402536	0,0323646	-1,24375	0,219064



Продовження таблиці 3

a ₁₃	-0,0207107	0,0323646	-0,639919	0,524982
a ₂₃	0,174229	0,0264256	6,59318	2,0352·10 ⁻⁸
a ₁₁	-0,417	0,0457704	-9,11068	1,96887·10 ⁻¹²
a ₂₂	-0,0939857	0,0373714	-2,51491	0,0149752
a ₃₃	-0,129986	0,0373714	-3,47821	0,00101702
ABS (8)				
a ₀₀	1,61442	0,0531097	30,3978	3,23774·10 ⁻³⁵
a ₁₀	0,452818	0,0316555	14,3046	7,7282·10 ⁻²⁰
a ₂₀	-0,164802	0,0258466	-6,37617	4,538·10 ⁻⁸
a ₃₀	0,111898	0,0258466	4,3293	0,0000667322
a ₁₂	-0,00155893	0,0387699	-0,0402098	0,968077
a ₁₃	-0,0367982	0,0387699	-0,949144	0,346855
a ₂₃	0,0935964	0,0316555	2,95672	0,00463452
a ₁₁	-0,237339	0,0548289	-4,32872	0,0000668604
a ₂₂	-0,166612	0,0447676	-3,72171	0,000479943
a ₃₃	-0,131755	0,0447676	-2,94308	0,0048132
TPU (9)				
a ₀₀	2,82432	0,056152	50,2978	2,06391·10 ⁻⁴⁶
a ₁₀	0,770971	0,0334688	23,0355	2,80666·10 ⁻²⁹
a ₂₀	-0,286019	0,0273272	-10,4665	1,66746·10 ⁻¹⁴
a ₃₀	0,230233	0,0273272	8,42508	2,35754·10 ⁻¹¹
a ₁₂	-0,0513643	0,0409907	-1,25307	0,21568
a ₁₃	-0,0426179	0,0409907	-1,0397	0,303202
a ₂₃	0,275136	0,0334688	8,22067	4,97814·10 ⁻¹¹
a ₁₁	-0,440369	0,0579696	-7,59655	4,95292·10 ⁻¹⁰
a ₂₂	-0,118686	0,047332	-2,50751	0,0152574
a ₃₃	-0,201614	0,047332	-4,25958	0,0000842237

В розкодованому вигляді без урахування незначущих коефіцієнтів за t-критерієм Стьюдента ($> t_{0,05}(63) = 2,00$):

– для Nylon:

$$k_f = -8,07387 - 0,0184752 H_f - 0,000939857 H_f^2 + 0,0266124 L_f + 0,00174229 H_f L_f - 0,00129986 L_f^2 + 2,76003 T_f - 0,185333 T_f^2; \quad (10)$$

– для ABS:

$$k_f = -5,18588 + 0,0194639 H_f - 0,00166612 H_f^2 + 0,0366767 L_f + 0,000935964 H_f L_f - 0,00131755 L_f^2 + 1,67317 T_f - 0,105484 T_f^2; \quad (11)$$

– для TPU:

$$k_f = -8,80365 - 0,0342665 H_f - 0,00118686 H_f^2 + 0,0422373 L_f + 0,00275136 H_f L_f - 0,00201614 L_f^2 + 3,05834 T_f - 0,19572 T_f^2. \quad (12)$$

Побудувавши тривимірний графік рівняння (10)–(12) на рис. 5 бачимо, що із збільшенням товщини заспокоювача T_f , зменшенням висоти п'яти H_f і збільшенням відстані її розміщення відносно вільного кінця

заспокоювача L_f спостерігається збільшення коефіцієнта запасу міцності k_f . Також з рисунку наочно видно, що напруженість σ_{fmax} є більшою для ABS, а меншою – для TPU.

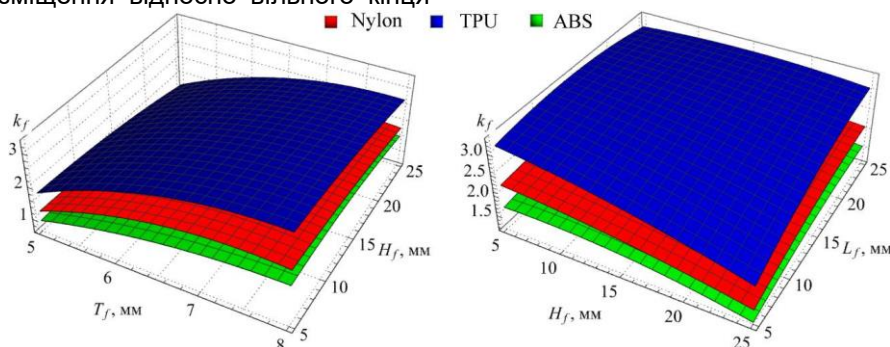


Рис. 5. Залежність коефіцієнта запасу міцності k_f від товщини заспокоювача T_f , висоти п'яти H_f і відстані її розміщення відносно вільного кінця заспокоювача L_f для різних матеріалів



Перевірка отриманих рівнянь (10)–(12) за коефіцієнтом кореляції Пірсона $r = 0,89$ дає змогу стверджувати про їхню адекватність на досліджуваному діапазоні варіювання факторів.

З рис. 4–5 наочно видно, що оптимуми критеріїв відрізняються. Це призводить до необхідності вирішення багатокритеріальної задачі оптимізації, яка зводиться до одночасного пошуку оптимальних значень двох конфліктних цільових критеріїв у визначених

діапазонах факторів:

$$\begin{cases} \sigma_{f \max}(T_f, H_f, L_f) \rightarrow \min, \\ k_f(T_f, H_f, L_f) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (13)$$

Для вирішення системи рівнянь (13) спільно із (4)–(6) і (10)–(12) приведемо критерії до безрозмірного одиничного виду й отримаємо:

$$\sigma'_{f \max}(T_f, H_f, L_f) = \frac{\sigma_{f \max}(T_f, H_f, L_f) - \min[\sigma_{f \max}(T_f, H_f, L_f)]}{\max[\sigma_{f \max}(T_f, H_f, L_f)] - \min[\sigma_{f \max}(T_f, H_f, L_f)]},$$

$$k'_f(T_f, H_f, L_f) = \frac{\max[k_f(T_f, H_f, L_f)] - k_f(T_f, H_f, L_f)}{\max[k_f(T_f, H_f, L_f)] - \min[k_f(T_f, H_f, L_f)]}. \quad (14)$$

Мультиплікативну функцію V будемо визначати як:

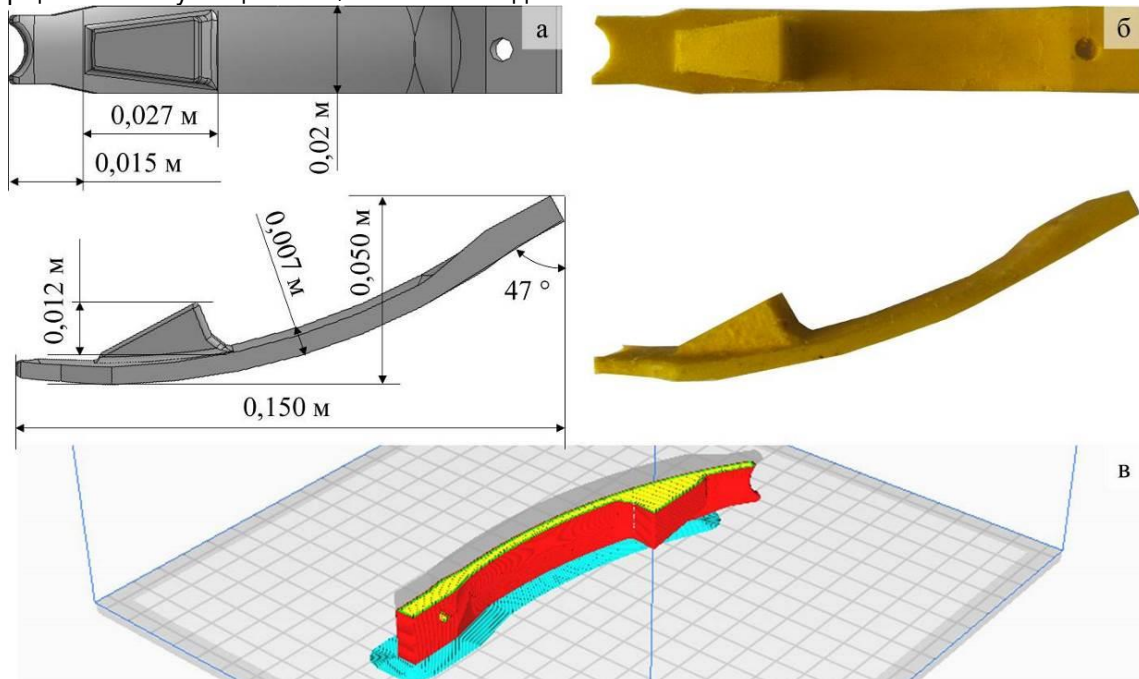
$$V'(T_f, H_f, L_f) = \sigma'_{f \max}(T_f, H_f, L_f) \times k'_f(T_f, H_f, L_f) \rightarrow \min. \quad (15)$$

Під час розв'язання задачі (15) спільно із (4)–(6) і (10)–(12) у Wolfram Cloud розраховані раціональні значення геометричних параметрів заспокоювача для різних матеріалів: Nylon – $T_f = 6,3$ мм $H_f = 12,6$ мм, $L_f = 14,7$ мм; ABS – $T_f = 6,5$ мм $H_f = 12,7$ мм, $L_f = 14,8$ мм; TPU – $T_f = 6,7$ мм $H_f = 11,9$ мм, $L_f = 14,3$ мм. Оскільки розраховані значення геометричних параметрів практично однакові для різних матеріалів, то розрахуємо їхні середні значення: $T_f = 6,5$ мм $H_f = 12,4$ мм, $L_f = 14,6$ мм. Згідно з рис. 5 коефіцієнт запасу міцності k_f є більшим для

TPU.

Подальші лабораторні дослідження проведені спільно з ТОВ «НВП» СОЮЗКОМПОЗИТ».

Відповідно до розрахованих конструктивних параметрів заспокоювача (рис. 6, а) виготовлені експериментальні зразки з різних конструктивних матеріалів (рис. 6, б). Технологія виготовлення – адитивна з екструзією матеріалу (Fused Deposition Modeling – FDM). Обладнання для виготовлення – 3D-принтер Anycubic і3 Mega-S. Програмне забезпечення для створення G-коду – Ultimaker Cura 4.12.1 (рис. 6, в).



а – 3D-модель заспокоювача; б – експериментальний зразок заспокоювача; в – програмне забезпечення Ultimaker Cura 4.12.1 для створення G-коду

Рис. 6. Проектування і виготовлення експериментальних зразків заспокоювача насіння

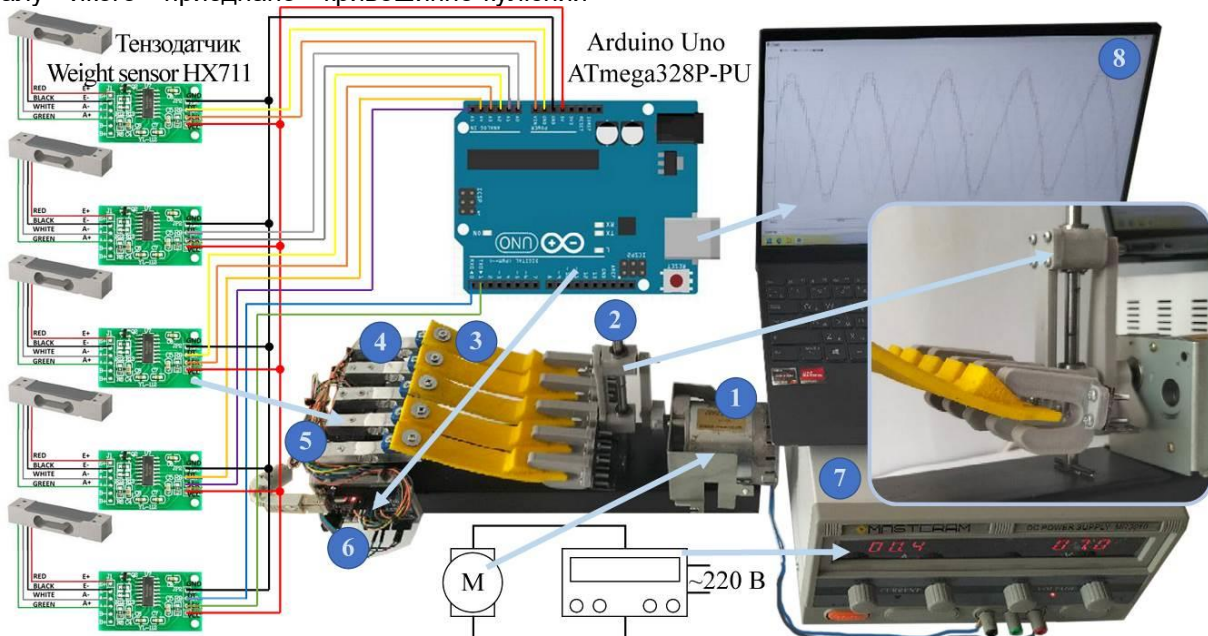
В якості матеріалів були обрані такі (рис. 7): Nylon, TPU, ABS.



Рис. 7. Експериментальні зразки заспокоювача насіння

Для дослідження деформації при згині створено лабораторну установку (рис. 8), яка складалась із двигуна постійного струму 1, до валу якого приєднано кривошипно-кулісний

виконавчий механізм 2. Зразки заспокоювача насіння 3 закріплені одним кінцем до тензодатчиків 4, а іншим вільно розміщені в утримувачі кривошипно-кулісного виконавчого механізму 2. Одночасно досліджуються чотири зразки заспокоювача насіння. Тензодатчики 4 за допомогою електричних проводів приєднані до аналого-цифрових перетворювачів HX711 5, які приєднані до плати керування Arduino Uno ATmega328P-PU 6. Двигун постійного струму 1 приєднано до лабораторного блоку живлення Masteram HPS3030D 7, а плати керування 6 з'єднується з персональним комп'ютером 8 із програмним забезпеченням Arduino IDE. При запуску двигуна постійного струму 1 кривошипно-кулісний виконавчий механізм 2 приводиться в дію і починаються коливання зразків заспокоювача насіння із амплітудою $\pm 0,015$ м і частотою 2 Гц. При цьому тензодатчики 4 із аналого-цифровими перетворювачами HX711 5 і платою керування Arduino Uno ATmega328P-PU 6 знімають динаміку зміни сили.



1 – двигун постійного струму; 2 – кривошипно-кулісний виконавчий механізм; 3 – зразки заспокоювача насіння; 4 – тензодатчик; 5 – аналого-цифровий перетворювач HX711; 6 – плата керування Arduino Uno ATmega328P-PU; 7 – лабораторний блок живлення Masteram HPS3030D; 8 – персональний комп'ютер із програмним забезпеченням Arduino IDE

Рис. 8. Лабораторна установка для дослідження деформації при згин

Ділянка залежності сили згину від часу для експериментальних зразків заспокоювача

насіння наведено на рис. 9.

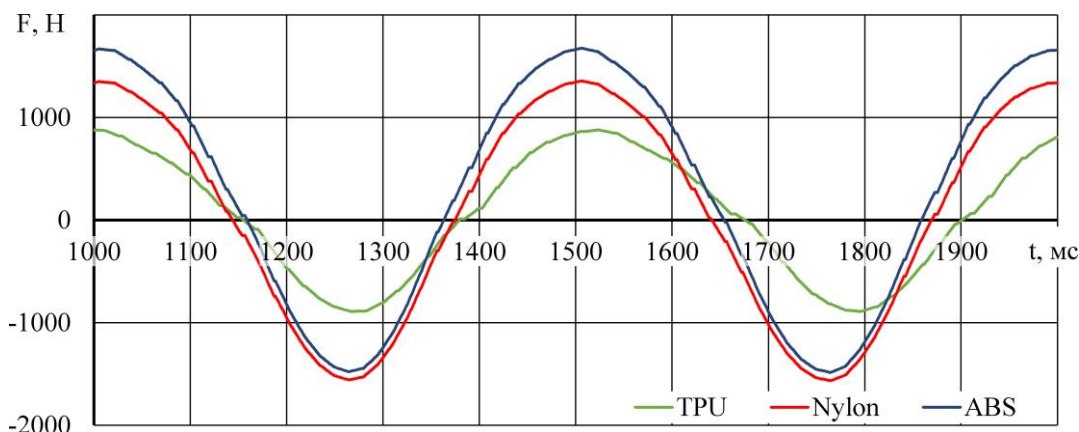
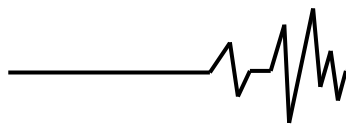


Рис. 9. Ділянка залежності сили згину від часу для зразків заспокоювача

Аналіз рис. 9 підтверджує теоретичний висновок щодо вибору в ролі матеріалу TPU, оскільки для його згину необхідно докласти найменших зусиль (827 Н).

Висновки та перспективи подальших досліджень. З використанням програмного пакету Simcenter STAR-CCM+ проведено симуляцію процесу коливання заспокоювача насіння, який знаходиться між причучувальним колесом і ґрунтом. У результаті симуляції було визначено розподіл абсолютної деформації сповільнювача Δu_f і напруженості σ_f , що виникає в кожній комірці створеної сітки заспокоювача. Отримані залежності максимального значення напруженості σ_{fmax} і коефіцієнта запасу міцності k_f від товщини заспокоювача T_f , висоти п'яти H_f і відстані її розміщення відносно вільного кінця заспокоювача L_f для різних матеріалів (Nylon, ABS, TPU).

Вирішуючи багатокритеріальну задачу оптимізації, яка зводиться до одночасного пошуку оптимальних значень двох критеріїв $\sigma_{fmax}(T_f, H_f, L_f) \rightarrow \min$, $k_f(T_f, H_f, L_f) \rightarrow \max$ отримані значення геометричних параметрів заспокоювача насіння: $T_f = 6,5$ мм $H_f = 12,4$ мм, $L_f = 14,6$ мм.

За результатами лабораторних досліджень встановлено, що в ролі матеріалу заспокоювача потрібно обрати TPU, оскільки для його згину необхідно докласти найменших зусиль (827 Н). Це підтверджується меншим коефіцієнтом запасу міцності k_f .

Список використаних джерел

1. Сало В., Лещенко С., Лузан П., Сало Л. (2022). Машини для сівби, садіння та догляду за посівами. Начальний посібник. ЦНТУ. Кропивницький. 220 с.

2. Науменко М. Макаренко Д., Гурідова В., Крутоус Д. (2021). Математична модель взаємодії сошника посівного комплексу з ґрунтом за ускладнених умов його експлуатації. Математичне моделювання, 1(44): 55–61. DOI:

10.31319/2519-8106.1(44)2021.235926

3. Алієв Е. Б., Безверхній П. Є. (2023). Дослідження чинників погіршення точності висіву пневматичними сівалками. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2 (121): 51–61. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-6.

4. Needham Ag Technologies. (2022). Product Guide. 88 p. https://store.needhamag.com/wp-content/uploads/Needham_Ag_2022_Product_Guide.pdf

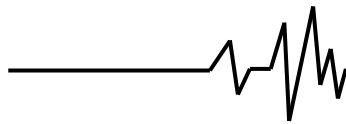
5. Kuş E. (2021). Field-scale evaluation of parameters affecting planter vibration in single seed planting. Measurement. 184: 109959. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109959.

6. Yu D, Peng F, Zeng Z, Zhang M, Yang W, Zang Y, He J, Huang Y, Wu Y, Zhong W, et al. Vibrational Dynamics of Rice Precision Hole Seeders and Their Impact on Seed Dispensation Efficacy. Agriculture. 2024; 14(2):324. DOI: 10.3390/agriculture14020324

7. Алієв Е. Б., Безверхній П. Є. (2022). Шляхи підвищення ефективності пневматичних сівалок точного висіву. Наукові аспекти формування сучасних агротехнологій – інновації молодих вчених для забезпечення сталого розвитку агропромислового комплексу: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, присвяченої Дню науки (20 травня 2022 року, м. Херсон). Херсон: ІЗЗ НААН, 158–159.

8. Алієв Е. Б., Безверхній П. Є., Алієва О. Ю. (2024). Результати аналітичних досліджень заспокоювача насіння удосконаленої висівної секції пневматичної сівалки. Техніка, енергетика, транспорт АПК. № 1 (124). С. 73–81. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-1-8.

9. Wang Y, Zhang W, Luo X, Zang Y, Ma L, Zhang W, Liu J, Zeng S. Effect of Vibration Conditions on the Seed Suction Performance of an Air-Suction Precision Seeder for Small Seeds. Agriculture. 2024; 14(4):559. DOI: 10.3390/agriculture14040559



10. Yu D, Peng F, Zeng Z, Zhang M, Yang W, Zang Y, He J, Huang Y, Wu Y, Zhong W, et al. Vibrational Dynamics of Rice Precision Hole Seeders and Their Impact on Seed Dispensation Efficacy. *Agriculture*. 2024; 14(2):324. DOI: 10.3390/agriculture14020324

11. Wei T., Bowei S., Ren D. (2021). Study of needle seeding machine vibration system. *Journal of Physics: Conference Series*. Bristol. 1865 (3). DOI: 10.1088/1742-6596/1865/3/032044

12. Деркач О. Д., Макаренко Д. О., Муранов Є. С., Лободенко А. В. (2021). Підвищення довговічності рухомих з'єднань посівних машин впровадженням прогресивних конструкційних матеріалів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 11 (2): 10.

13. Алієв Е. Б. (2023). Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука, 340 с. ISBN 978-966-540-584-9. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9

14. Макаренко Д. О., Деркач О. Д., Говоруха В. Б., Веселовська Н. Р. (2023). Модернізація рухомих з'єднань секції посівного комплексу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 123 (4): 12–20. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-4-2.

References

1. Salo V., Leshchenko S., Luzan P., Salo L. (2022). *Mashyny dlya sivy, sadinnya ta dohlyadu za posivamy [Machines for sowing, planting and caring for crops]*. Nachal'nyy posibnyk. TSNTU. Kropyvnyts'kyi. 220 s. [in Ukrainian].

2. Naumenko M. Makarenko D., Huridova V., Krutous D. (2021). *Matematychna model' vzayemodiyi soshnyka posivnoho kompleksu z gruntom za uskladnenykh umov yoho ekspluatatsiyi [Mathematical model of the interaction of the coulter of the sowing complex with the soil under the complicated conditions of its operation]*. *Matematyчне modelyuvannya*, 1(44): 55–61. DOI: 10.31319/2519-8106.1(44)2021.235926. [in Ukrainian].

3. Aliiev E. B., Bezverkhniy P. E. (2023). *Doslidzhennya chynnykiv pohirshennya tochnosti vysivu pnevmatychnykh sivalokamy [Study of the factors of deterioration of sowing accuracy with pneumatic seed drills]*. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 2 (121): 51–61. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-6 [in Ukrainian].

4. Needham Ag Technologies. (2022). *Product Guide*. 88 p. https://store.needhamag.com/wp-content/uploads/Needham_Ag_2022_Product_Guide.pdf

5. Kuş E. (2021). Field-scale evaluation of parameters affecting planter vibration in single seed planting. *Measurement*. 184: 109959. DOI:

10.1016/j.measurement.2021.109959.

6. Yu D, Peng F, Zeng Z, Zhang M, Yang W, Zang Y, He J, Huang Y, Wu Y, Zhong W, et al. Vibrational Dynamics of Rice Precision Hole Seeders and Their Impact on Seed Dispensation Efficacy. *Agriculture*. 2024; 14(2):324. <https://doi.org/10.3390/agriculture14020324>

7. Aliiev E. B., Bezverkhniy P. YE. (2022). *Shlyakhy pidvyschennya efektyvnosti pnevmatychnykh sivalok tochnoho vysivu [Ways to improve the efficiency of precision sowing pneumatic seed drills]*. *Naukovi aspekty formuvannya suchasnykh ahrotekhnolohiy – innovatsiyi molodykh vchenykh dlya zabezpechennya staloho rozvytku ahropromyslovoho kompleksu: materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi molodykh vchenykh, prysvyachenoyi Dnyu nauky (20 travnya 2022 roku, m. Kherson)*. Kherson: IZZ NAAN, 158–159. [in Ukrainian].

8. Aliiev E. B., Bezverkhniy P. Ye., Aliieva O. YU. (2024). *Rezultaty analitychnykh doslidzen' zaspokoyuvacha nasynnya udoskonalenoyi vysivnoyi sektsiyi pnevmatychnoyi sivalky [Results of analytical studies of the seed pacifier of the improved sowing section of the pneumatic seeder]*. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. № 1 (124). S. 73–81. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-1-8. [in Ukrainian].

9. Wang Y, Zhang W, Luo X, Zang Y, Ma L, Zhang W, Liu J, Zeng S. Effect of Vibration Conditions on the Seed Suction Performance of an Air-Suction Precision Seeder for Small Seeds. *Agriculture*. 2024; 14(4):559. DOI: 10.3390/agriculture14040559

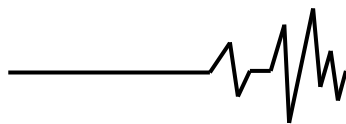
10. Yu D, Peng F, Zeng Z, Zhang M, Yang W, Zang Y, He J, Huang Y, Wu Y, Zhong W, et al. Vibrational Dynamics of Rice Precision Hole Seeders and Their Impact on Seed Dispensation Efficacy. *Agriculture*. 2024; 14(2):324. DOI: 10.3390/agriculture14020324

11. Wei T., Bowei S., Ren D. (2021). Study of needle seeding machine vibration system. *Journal of Physics: Conference Series*. Bristol. 1865 (3). DOI: 10.1088/1742-6596/1865/3/032044

12. Derkach O. D., Makarenko D. O., Muranov YE. S., Lobodenko A. V. (2021). *Pidvyschennya dovhovichnosti rukhomykh z'yednan' posivnykh mashyn vprovadzhenyamy prohresyvnnykh konstruktsiynykh materialiv [Increasing the durability of movable joints of sowing machines by introducing advanced construction materials]*. *Naukovyy visnyk Tavriys'koho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu*, 11 (2): 10. [in Ukrainian].

13. Aliiev E. B. (2023). *Chysel'ne modelyuvannya protsesiv ahropromyslovoho vyrobnytstva: pidruchnyk [Numerical modeling of agro-industrial production processes: a textbook]*. Kyiv: Ahrarna nauka, 340 s. ISBN 978-966-540-584-9. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9. [in Ukrainian].

14. Makarenko D. O., Derkach O. D.,



Hovorukha V. B., Veselovs'ka N. R. (2023). Modernizatsiya rukhomykh z'yednan' seksiyi posivnoho kompleksu [Modernization of movable connections of the sowing complex section]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 123 (4): 12–20. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-4-2. [in Ukrainian].

JUSTIFICATION OF THE DESIGN PARAMETERS OF THE SEED QUIET OF THE SOWING SECTION OF THE PNEUMATIC SEEDER

The problem of seed ejection from the furrow during sowing with the John Deere 90 Series planter can be solved by installing a seed firmer. However, factory seed firmers wear out quickly after treating 500–600 hectares. This indicates the need to improve the design and selection of materials for the firmers to ensure their durability. Further research and testing will help find optimal solutions to reduce wear and increase the efficiency of seed firmers.

The goal is to conduct numerical modeling and laboratory studies of the oscillations of the seed firmer of the John Deere 90 Series pneumatic planter and to justify its design parameters and material selection.

Using the Simcenter STAR-CCM+ software

package, a simulation of the seed firmer's oscillation process, which is located between the press wheel and the soil, was carried out. As a result of the simulation, the distribution of the seed firmer's absolute deformation Δy_f and stress σ_f in each cell of the created mesh was determined. The dependencies of the maximum stress value σ_{fmax} and the safety factor k_f on the firmer's thickness T_f , the heel height H_f , and the distance of its placement relative to the free end of the firmer L_f for different materials (Nylon, ABS, TPU) were obtained.

By solving a multi-criteria optimization problem, which reduces to the simultaneous search for optimal values of two criteria, the geometric parameters of the seed firmer were obtained: $T_f = 6.5$ mm, $H_f = 12.4$ mm, $L_f = 14.6$ mm.

Based on laboratory studies, it was established that TPU should be chosen as the material for the seed firmer, as the least force (827 N) is required for its bending. This is confirmed by a lower safety factor k_f .

Key words: seed, precision sowing, pneumatic seeder, seed stabilizer, oscillations, simulation, material, parameters, margin of safety.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Алієв Ельчин Бахтияр огли – доктор технічних наук, старший дослідник, професор кафедри інжинірингу технічних систем Дніпровського державного аграрно-економічного університету (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна, 49000, e-mail: aliev@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4006-8803>)

Дудін Володимир Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інжинірингу технічних систем Дніпровського державного аграрно-економічного університету (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна, 49000, e-mail: dudin.v.yu@dsau.dp.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1414-7690>)

Безверхній Петро Євгенович – здобувач третього освітньо-наукового рівня Дніпровського державного аграрно-економічного університету (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна, 49000, e-mail: bezverhniijpetro5@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-0368-7870>).

Шаповал Олександр Миколайович – засновник ТОВ «НВП» СОЮЗ-КОМПОЗИТ» (Нижньодніпровська, 1, м. Дніпро, Україна, 69091, e-mail: nvp.composite@gmail.com).

Elchyn Aliiev – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor of the Departments of Mechanization of Production Processes in Animal Husbandry of Dnipro State Agrarian and Economic University (St. S. Efremova, 25, Dnipro, Ukraine, 49000, e-mail: aliev@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4006-8803>).

Volodymyr Dudin – Ph.D., associate professor, head of the technical systems engineering department of Dnipro State Agrarian and Economic University (St. S. Efremova, 25, Dnipro, Ukraine, 49000, e-mail: dudin.v.yu@dsau.dp.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1414-7690>).

Petro Bezverkhniij – recipient of the third educational and scientific level of the Dnipro State Agrarian and Economic University (St. S. Efremova, 25, Dnipro, Ukraine, 49000, e-mail: bezverhniijpetro5@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-0368-7870>).

Oleksandr Shapoval – founder of TOV «NVP» SOYUZ-KOMPOZYT» (Nizhnyodniprovska, 1, Dnipro, Ukraine, 69091, e-mail: nvp.composite@gmail.com).