

ISSN 2414-3820

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

**КОНСТРУЮВАННЯ, ВИРОБНИЦТВО
ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ
МАШИН**

Загальнодержавний міжвідомчий
науково-технічний збірник

Випуск 48

Кропивницький • 2018

ISSN 2414-3820

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
Central Ukrainian National Technical University

**DESIGN, PRODUCTION
AND EXPLOITATION
OF AGRICULTURAL MACHINES**

National Interagency Scientific
and Technical Collection of Works

Issue 48

Kropyvnytskyi • 2018

УДК 631.3.001.1 (082)

Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, вип. 48. – Кропивницький: ЦНТУ, 2018. – 202 с.

В збірнику викладені питання конструювання, розрахунку, удосконалення, створення і дослідження нових робочих органів сільськогосподарських машин, засобів механізації, електрифікації та автоматизації сільськогосподарського виробництва. Наведені результати досліджень в галузі технологій виробництва і експлуатації машин та забезпечення їх надійності і довговічності. Викладені практичні рекомендації по використанню результатів досліджень і дослідно-конструкторських розробок в сільськогосподарській і інших галузях машинобудування. Збірник розрахований на наукових та інженерно-технічних працівників науково-дослідних установ, ВНЗ, конструкторських організацій та промислових підприємств.

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол від 20 грудня 2018 року № 5.

Редакційна колегія: Черновол М.І., д.т.н., проф. – головний редактор;
Сало В.М., д.т.н., проф. – заст. головного редактора;
Лещенко С.М., к.т.н., доц. – відповідальний секретар;
Анікевич Л.В., д.т.н., проф.;
Дідух В.Ф., д.т.н., проф.;
Караєв О.Г., д.т.н., ст. наук. співр.;
Кропівний В.М., к.т.н., проф.;
Носуленко В.І., д.т.н., проф.;
Осадчий С.І., д.т.н., проф.;
Павленко І.І., д.т.н., проф.;
Петренко Д.І., к.т.н., доц.;
Свірень М.О., д.т.н., проф.;
Харченко С.О., д.т.н., доц.;
Iurie Melnic, Ph.D., Associate Professor (Молдова);
Predrag Dašić, Hon.D.Sc. (Serbia);
Andrii Yatskul, Ph.D., Associate Professor (Франція).

Адреса редакційної колегії: 25030, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8, Центральноукраїнський національний технічний університет, тел.: 390-581, 390-472, 55-10-49.

Автори опублікованих матеріалів несуть відповідальність за підбір і точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей, а також за те, що матеріали не містять даних, які не підлягають відкритій публікації. Редакція може публікувати статті в порядку обговорення, не поділяючи точки зору автора.

Заснований у 1971 р.

Включений до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватись результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних наук (бюлетень ВАК №5 від 2010р., наказ Міністерства освіти і науки України від 21 грудня 2015 року №1328, наказ Міністерства освіти і науки України від 07 листопада 2018 року №1218).

Збірник наукових праць зберігається в загальнодержавній реферативній базі даних «*Україніка наукова*» Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського та представлений у міжнародній наукометричній базі даних **Word Cat, CrossRef, ResearchBib, Google Scholar**

Реєстраційне свідоцтво: серія KB №23511 - 13351 ПР від 13.07.2018 р.
ISSN 2414-3820 (p) DOI: 10.32515/2414-3820

УДК 621.436.016

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.3-11>

И.И. Бешлягэ, канд. техн. наук, **Л.Г. Малай**, канд. техн. наук

Государственный аграрный университет Молдовы, г. Кишинёв, Молдова

e-mail: i.besleaga@uasm.md, e-mail: leondanus@mail.ru

Анализ термодинамических процессов двигателей внутреннего сгорания работающих на биодизеле

В работе представлен расчет теплового сжатия двигателя с воспламенением, который определяет сравнительные параметры технологического цикла работы, энергетические и экономические показатели, давление работы газового цилиндра дизеля и биотоплива.

дизельное топливо, выброс газа, горючие вещества, тракторные двигатели, коэффициент избытка воздуха, температура остаточного газа

І. І. Бешляге, канд. техн. наук, **Л.Г. Малай**, канд. техн. наук

Державний аграрний університет Молдови, м. Кишинів, Молдова

Аналіз термодинамічних процесів двигунів внутрішнього згоряння, що працюють на біодизелі

В роботі представлений розрахунок теплового стиску двигуна із запалюванням, який визначає порівняльні параметри технологічного циклу роботи, енергетичні та економічні показники, тиск роботи газового циліндра дизеля і біопалива.

дизельне паливо, викид газу, горючі речовини, тракторні двигуни, коефіцієнт надлишку повітря, температура залишкового газу

Постановка проблемы. Европейский Союз стал ведущим производителем биодизельного топлива, которое обеспечивает 77% мирового производства. Крупнейшими его производителями являются Германия, Италия, Франция. В Германии производство биодизеля увеличилось в 14 раз, во Франции в 2,4 раза, Италии в 1,3 раза.

Использование биодизельного топлива из растительных масел одобрено для автомобилей моделей AUDI, BMW, MERCEDES C220, для всех моделей FORD, оснащенных двигателями 1,8 и 2,51, а так же для некоторых моделей MAN.

Компания «Rompertrol-Moldova» расширила ассортимент топлива, продаваемого на заправках PECO, благодаря поставкам в республику дизельного топлива EURO Diesel, содержащего 6% биодизеля (стандарт Еуро-4) и специального пакета присадок Efix, которые удаляют отложения каламина в двигателях внутреннего сгорания (ДВС). В то же время, испытания показали, что расход этого топлива снижается на 1%.

Биодизель – это «отечественный» продукт, возобновляемое топливо, которое может использоваться в дизельных двигателях, не требующих изменений в энергосистеме. Это безопасный продукт, уменьшающий количество загрязняющих веществ, таких как зола, твердые частицы, монооксид углерода, углеводороды и нокса. Требования к производительности, хранению и техобслуживанию аналогичны требованиям, предъявляемым к нефтяным топливам. Биодизель не содержит ароматических соединений или сульфидов, что способствует сокращению выбросов загрязняющих веществ, имеет довольно высокое цетановое число и лучшие смазочные свойства, по сравнению с нефтяным топливом.

Появилась необходимость в проведении теоретических исследований по расчету и анализу термодинамических процессов двигателей внутреннего сгорания, работающих на чистом биодизеле или в смеси с дизельным топливом в различных пропорциях.

Двигатели с воспламенением от сжатия работают под высоким давлением газа внутри цилиндра, с высокой степенью сжатия, обеспечивающей повышенную мощность двигателя, крутящий момент двигателя и снижение расхода топлива на блоке питания.

Целью данной работы является проведение теоретических исследований по расчету и анализу термодинамических процессов двигателей внутреннего сгорания, работающих с использованием чистого биодизеля, полученного из рапсового масла, в процессе переэтерификации в установке, предназначенной для этого химического процесса, с использованием указанной схемы.

Анализ последних исследований и публикаций. В основу расчета был принят усовершенствованный метод Гриневецкого, описанный в работе [1], который представляет собой аналитический метод расчета путем коррекции теоретической справочной диаграммы. Этот метод может применяться как на стадии проектирования, так и на стадии улучшения прототипа, но в этом случае также используется другой тип топлива (биодизель).

Исходные данные необходимы для расчета рабочего цикла двигателя, используемого для испытаний 4D 125/110 (далее D-241L), который представляет собой дизельный двигатель прямого впрыска. Его оценка была дана по результатам исследований на стенде с электрическим тормозом КІ 13638 ГОСНИТИ (ГОСТ 18509-88), авторами [2].

Постановка задачи. Целью данных исследований является получение термодинамических характеристик двигателя, работающего на биодизеле и сравнение их с классическими.

Изложение основного материала. Далее приводится расчет температуры, выполненный в соответствии с выбранным методом, причем двигатель имеет следующие характеристики, указанные в табл. 1, определяемые по характеристикам скорости вращений.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета

Параметры	Виды топлива	
	Солярка	Биотопливо
Номинальная мощность двигателя, кВт ($P_{\text{мощ}}$).	58,9	58,9
Номинальные обороты, мин^{-1}	2100	2100
Удельное эффективное потребление топлива, г/кВтч	252	252
Количество цилиндров	4	4
Соотношение компресии	16	16
Цетановое число топлива	51	41
Содержание серы в топливе, %	0,2	0,0012
Состав топлива C:H:O, %	86:14:0	78:10:12
Низкая теплоотдача, МД/кг	43,89	43,24
Абсолютная плотность, г/см ³	0,834	0,846

Источник: [1]

Выбор исходных параметров. Ряд предварительных значений, необходимых для расчета температуры, выбираются на основе данных, имеющихся в литературе по специальности [3-9], а также на основе экспериментов данной работы, таких как:

- исходная температура: $T_0 = 293K$;
- исходное давление $p_0 = 1,02 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$;
- температура остаточных газов: $T_r = 900K$;
- давление остаточных газов: $p_r = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$;
- коэффициент избыточного воздуха: $\lambda = 1,25$.

Параметры процесса изменения газа. Принимаются следующие размеры: давление в конце впрыска: $p_a = 0,86 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$;

- предварительный нагрев смеси: $\Delta T = 15 K$;
- коэффициент заполнения: $v_p = 1,14$.

Далее рассчитываются остаточные газы по формуле:

$$\gamma_r = \frac{T_o + \Delta T \cdot p_r}{T_r \cdot \varepsilon \cdot v_p - p_r}. \quad (1)$$

Температура в конце впрыска определяется по формуле:

$$T_a = \frac{T_o + \Delta T + \gamma_r T_r}{1 - \gamma_r}. \quad (2)$$

Коэффициент заполнения будет равен:

$$\eta_v = \frac{p_a \cdot T_o}{p_o \cdot T_a} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{v_p}{1 + \gamma_r}. \quad (3)$$

Параметры процесса сжатия. В реальном цикле двигателя процесс сжатия сопровождается взаимными изменениями тепла между рабочей средой и деталями двигателя, поэтому этот процесс не является адиабатическим. Процесс сжатия в двигателях с воспламенением от сжатия осуществляется политропно с постоянным показателем. Для коэффициента политропного сжатия принимается значение $n_1 = 1,6$.

Давление в конце сжатия определяется по формуле:

$$P_c = P_a \cdot \varepsilon^{n_1}. \quad (4)$$

Температура в конце сжатия будет равна:

$$T_c = T_a \cdot \varepsilon^{n_1 - 1}. \quad (5)$$

Параметры процесса горения. В соответствии с рекомендациями, приведенными в таблицах 4 и 5 [4], принимаются следующие коэффициенты:

- коэффициент использования тепла; $\xi = 0,75$;
- коэффициент повышения давления $\pi = 1,3$

Минимальное количество воздуха, необходимого для сжатия 1 кг топлива рассчитывается по формуле:

$$L_{\min} = \frac{1}{0,21} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right). \quad (6)$$

Реальное количество воздуха необходимого для сгорания топлива:

$$L = \lambda \cdot L_{\min}. \quad (7)$$

Теоретический коэффициент молярного изменения свежей нагрузки:

$$\mu_o = \frac{L + \frac{H}{4} + \frac{C}{12}}{L}. \quad (8)$$

Фактический коэффициент молярного изменения свежей нагрузки:

$$\mu_f = \frac{\mu_o + \gamma_r}{1 + \gamma_r}. \quad (9)$$

Среднее молярное удельное тепло исходной смеси равно:

$$c'_{\mu\nu} = 20 + 17,4 \cdot 10^{-3} \cdot T_c. \quad (10)$$

Среднее удельное молярное тепло газов сгорания при $\lambda > 1$ равно:

$$c''_{\mu\nu} = \left(20 + \frac{9,2}{\lambda}\right) + \left(\frac{13,8}{\lambda} + 15,5\right) \cdot 10^{-4} T_z. \quad (11)$$

Температура в конце сгорания определяется следующим уравнением:

$$\frac{\zeta Q_1}{\lambda L_{\min} (1 + \gamma_r)} + (c'_{\mu\nu} + R_m \cdot \pi) \cdot T_c = (c''_{\mu\nu} + R_m) \cdot \mu_f \cdot T_z. \quad (12)$$

Давление в конце сгорания рассчитывается по формуле:

$$P_z = P_z' = \pi \cdot P_c. \quad (13)$$

Степень предварительной плотности рассчитывается из соотношения:

$$\rho = \frac{V_z}{V_c} = \frac{\mu}{\pi} \cdot \frac{P_z}{T_c}. \quad (14)$$

Вычисленные параметры процесса сгорания показаны в табл. 2.

Таблица 2 – Расчетные параметры процесса сгорания двигателей с воспламенением от сжатия

Параметры	Параметр	Виды топлива	
		Солярка	Биотопливо
Минимальное количество воздуха необходимого для сгорания 1 кг топлива, $\frac{K \cdot \text{мол} \cdot \text{воздуха}}{\text{кг} \cdot \text{топлива}}$	$L_{\min}$	0,4759	0,41071
Реальное количество воздуха, $\frac{K \cdot \text{мол} \cdot \text{воздуха}}{\text{кг} \cdot \text{топлива}}$	L	0,5948	0,5214
Теоретический коэффициент молярного изменения свежей нагрузки	μ_o	1,18	1,11
Реальный коэффициент молярного изменения свежей нагрузки	μ_f	1,19	1,13
Среднее молярное удельное тепло, $\frac{\text{kJ}}{\text{кмол}}$	$c'_{\mu\nu}$	35,057	35,057
Температура в конце сгорания, °K	T_z	2098,5	1955,07
Давление в конце сгорания $\cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$	P_z	48,533	48,533
Степень предварительного ослабления	ρ	2,234	1,955

Источник: разработано авторами

Параметры процесса ослабления. Процесс ослабления сопровождается следующими явлениями: сжигание топлива при ослаблении, диссоциация продуктов сгорания, передача тепла от газов к частям двигателя, частичный выход газов между поршнем и цилиндром в картере двигателя. Принимается коэффициент политропного ослабления $n_2 = 1,25$.

Степень ослабления равна:

$$\delta = \frac{V_b}{V_z} = \frac{\varepsilon}{\rho}. \quad (15)$$

Давление в конце ослабления рассчитывается из соотношения:

$$P_b = \frac{P_z}{\delta^{n_2}}. \quad (16)$$

Температура в конце ослабления равна:

$$T_b = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}}. \quad (17)$$

Рассчитанные значения процесса ослабления представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Параметры процесса ослабления двигателей с воспламенением от сжатия

Двигатель с воспламенением от сжатия работающий на:	Степень ослабления	Давление в конце ослабления; P_b	Температура в конце ослабления; T_b
Солярке	7,161	$4,142 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$	1282,81 К
Биотопливе	8,182	$3,506 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$	1155,95 К

Источник: разработано авторами

Основные параметры двигателя. Принимаются следующие параметры [4] для:

- коэффициента округления диаграммы: $\mu_r = 0,94$
- механической производительности: $\eta_m = 0,8$ (6; с. 238)

Среднее давление теоретического цикла исходит из соотношения:

$$P_i' = \frac{P_c}{\delta - 1} \left[\pi(\rho - 1) + \frac{\pi \cdot \rho}{n_2 - 1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_1-1}} \right) \right]. \quad (18)$$

Указанное среднее давление равно:

$$P_i = \mu_f \cdot P_i'. \quad (19)$$

Указанная производительность двигателя определяется из соотношения:

$$\eta_i = R_m \cdot \frac{P_i \cdot M_i \cdot T_c}{P_o \cdot \eta_v \cdot Q_i} = 8,314 \frac{P_i \cdot \lambda L_{\min} \cdot T_c}{P_o \cdot \eta_v \cdot Q_i}. \quad (20)$$

Эффективное среднее давление исходит из соотношения:

$$p_e = \eta_m P_i. \quad (21)$$

Эффективная производительность двигателя будет равен:

$$\eta_e = \eta_m \eta_i. \quad (22)$$

Удельное эффективное потребление топлива рассчитывается формулой:

$$g_e = \frac{3600}{\eta_e \cdot Q_i}. \quad (23)$$

Рассчитанные значения представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Рассчитанные основные параметры двигателей с воспламенением от сжатия

Параметры	Символ параметра	Двигатели с воспламенением от сжатия	
		Солярка	Биотопливо
Среднее давление теоретического цикла, $\cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$	P_i'	11,042	8,087
Указанное среднее давление, 10^5 Н/м^2	P_i	10,379	7,602
Указанная производительность двигателя	η_i	0,37	0,33
Эффективное среднее давление, $\cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$	p_e	8,303	6,081
Эффективная производительность двигателя	η_e	0,296	0,208
Удельное эффективное потребление топлива, г/кВтч	g_e	277	315

Источник: разработано авторами

Проверка фундаментальных размеров двигателя.

Принимается соотношение пробег-диаметр по конструкции двигателя D 241L:

$$\Phi = \frac{S}{D} = 1,136.$$

где $S = 125$ мм – движение поршня;

$D = 110$ мм – диаметр поршня;

Цилиндрическая емкость по прототипу равна:

$$V_h = 1,187 \text{ л.}$$

Общая цилиндричность двигателя по прототипу:

$$V_i = 4,75 \text{ л.}$$

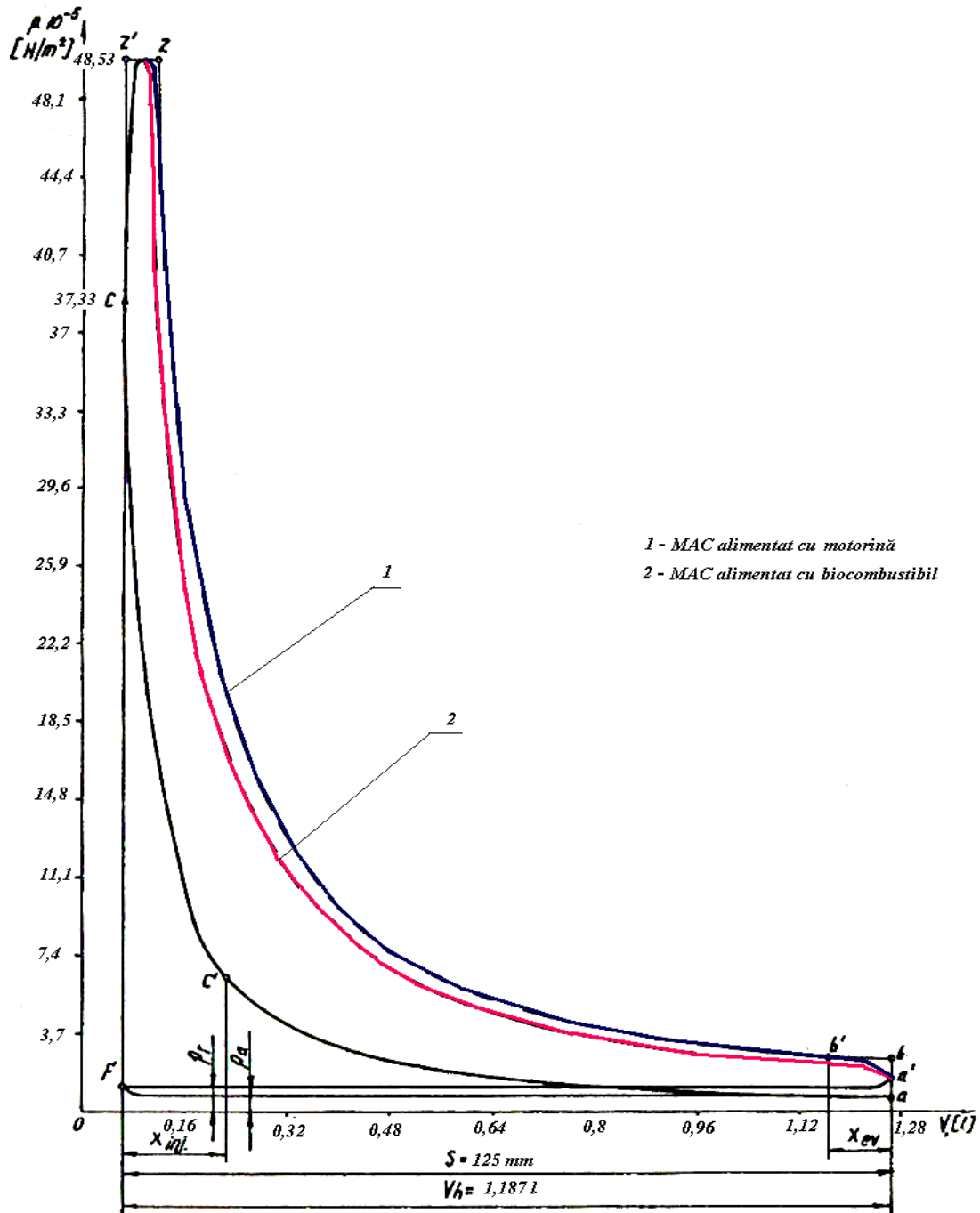
В таблице 5 представлены основные параметры двигателя D-241L по сравнению с экспериментальными данными на стенде.

Таблица 5 – Основные рассчитанные параметры двигателя D-241L сравнительно с экспериментальными данными на стенде

Параметры	Рассчитанные значения		Экспериментальные данные	
	Солярка	Биотопливо	Солярка	Биотопливо
Эффективная мощность, кВт	58,9	58,9	50,65 (8670% $P_{\text{ном}}$)	50,65(86% $P_{\text{ном}}$)
Удельное потребление топлива, г/кВтч	277	315	251	290
Степень компрессии	16	16	16	16
Вращение двигателя, мин ⁻¹	2100	2100	2100	2100
Давление в конце сжатия, $p_c \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$	37,333	37,333	-	-
Среднее эффективное давление, $p_e \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$	8,303	6,081	-	-

Продолжение таблицы 1

Указанная производительность, η_i	0,37	0,33	-	-
Механическая производительность, η_m	0,8	0,8	-	-
Эффективная производительность, η_e	0,296	0,264		



1 – (ДВС) Двигатели с воспламенением от сжатия заправленной соляркой
2 – (ДВС) Двигатели с воспламенением от сжатия заправленной биотопливом

Рисунок 1 – Рассчитанная диаграмма двигателя с воспламенением от сжатия

Источник: разработано авторами [2]

На основе полученных ранее расчетных значений, намечается указанная диаграмма координат $p - v$. В выбранной системе координат отмечаются точки a, c, z^1, z, b и указываются соответствующие кривые (рис.1).

Выводы. На основе теоретических исследований по анализу термодинамических процессов двигателей внутреннего сгорания, работающих на биодизеле, приводятся следующие выводы:

1. Мощность двигателей с воспламенением от сжатия, работающих на биодизеле, обеспечит снижение среднего давления теоретического цикла на 26,8, а эффективной мощности двигателя на 29,8% по сравнению с двигателем работающем на нефтяном топливе, благодаря тому, что биодизельное топливо обладает более низкой теплоотдачей по сравнению с соляркой.

2. Биотопливо, имеющее в своем составе 12% кислорода (3), требует при сгорании в двигателях с воспламенением от сжатия наименьшее количество воздуха (13,7%), чем при сгорании солярки.

3. При заправке двигателей с воспламенением от сжатия биодизелем, поддержание проектируемой номинальной мощности (58,9 кВт) будет обеспечено удельным расходом топлива увеличенного на 13,72% по сравнению с заправкой двигателей с воспламенением от сжатия работающих на дизельном топливе.

Список литературы

1. Двигатели для тракторов и автомобилей. Том III. / Бобеску Г. и др. К.: Техника, 2000. 328 с.
2. Энергетические достижения дизельного двигателя работающего на биодизеле / Лакуста И. и др. *Сельское хозяйство Молдовы*, 2009. № 7-8. С. 26-28.
3. Frunze O. Cercetări privind eficiența economică și ecologică a utilizării uleiurilor vegetale pentru alimentarea MAC. Braşov, 2005. 169 p.
4. Двигатели для тракторов и автомобилей. Том I. / Бобеску Г. и др. К.: Техника, 1997. С. 238.
5. Панкратов Г. П. Двигатели внутреннего сгорания. Автомобили, тракторы и их эксплуатация. М.: Высш. Школа, 1979. 296 С.
6. Вахламов В. К., Шатров М. Г., Юрчевский А. А. Теория и конструкция автомобиля и двигателя. М.: Академия, 2003. 816 с.
7. Бешляга И. Использование биотоплива для заправки дизельных двигателей. К.: Print-Caro, 2011. 111 с.
8. Стуканов В. А. Основы теории автомобильных двигателей и автомобиля. М.: Форум: Инфра-М, 2005. 368 с.
9. Соціально-економічне забезпечення пасажирського транспорту загального користування / Мороз М.М. та ін. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Северодонецьк, 2018. Вип. 1 (242). С. 100-105.
10. Болтинский В. Н. Теория, конструкция и расчет тракторных и автомобильных двигателей. М.: Сельхозиздат, 1962. 391 с.

References

1. Bobesku, G. et al. (2009). Dvigateli dlya traktorov i avtomobiley [Engines for tractors and cars]. Vol. III. K.: Tehnika [in Russian].
2. Lakusta, I. et al. (2009). Energeticheskie dostizheniya dizelnogo dvigatelya rabotayuschego na biodizele [Energy achievements of a diesel engine running on biodiesel]. *Selskoe hozyaystvo Moldovy*. 7-8, 26-28 [in Russian].
3. Frunze, O. (2005). Cercetări privind eficiența economică și ecologică a utilizării uleiurilor vegetale pentru alimentarea MAC. Braşov [in English].
4. Bobesku, G. i dr. (1997). Dvigateli dlya traktorov i avtomobiley [Engines for tractors and cars]. Vol. I. K.: Tehnika [in Russian].
5. Pankratov, G. P. (1979). Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Avtomobili, traktory i ih ekspluatatsiya. [Internal combustion engines. Cars, tractors and their operation]. Moscow: Vyissh. Shkola [in Russian].

6. Vahlamov, V. K., Shatrov, M. G., Yurchevskiy, A. A. (2003). Teoriya i konstruktsiya avtomobilya i dvigateleya [Theory and design of the car and engine]. Moscow: Akademiya [in Russian].
7. Beshlyaga, I. (2011). Ispolzovanie biotopliva dlya zapravki dizelnykh dvigateley [Use of biofuel for refueling diesel engines]. K.: Print-Caro [in Russian].
8. Moroz, M. M., Korol, S. O., Moroz, O. V., Marchenko D. M., Yepyfanova O. V. (2018). Socialno-ekonomichne zabezpechennya pasazhyrskogo transportu zagalnogo korystuvannya [Socio-economic provision of passenger transport of general use]. *Visnyk Sxidnoukrayinskogo nacionalnogo universytetu imeni Volodymyra Dalya*. Syevyerodoneczk. Vol. 1 (242), 100-105 [in Ukrainian].
9. Stukanov V. A. (2005). Osnovyi teorii avtomobilnykh dvigateley i avtomobilya [Fundamentals of the theory of automobile engines and automobiles]. Moscow: Forum: Infra-M [in Russian].
10. Boltinskiy V. N. (1962). Teoriya, konstruktsiya i raschet traktornykh i avtomobilnykh dvigateley [Theory, design and calculation of tractor and automobile engines]. Moscow: Selhozizdat [in Russian].

Igor Bershliage, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Leonid Malai**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

State Agrarian University of Moldova, Chisinau, Moldova

Analysis of the Thermodynamic Processes of Internal Combustion Engines Operating on Biodiesel

Biodiesel is a safe product that reduces the amount of pollutants such as ash, particulate matter, carbon monoxide, hydrocarbons and other harmful substances. The use of this fuel has been approved by many European manufacturers for use in automobiles. Therefore, it became necessary to carry out theoretical studies on the calculation and analysis of the thermodynamic processes of internal combustion engines operating in pure biodiesel or mixed with diesel fuel in various proportions.

The paper presents the calculation of the thermal compression of the engine with ignition, which determines the comparative parameters of the technological cycle of work, energy and economic indicators, the pressure of the gas cylinder of a diesel engine and biofuel. The calculation was based on the improved Grinevetskyi method, which is an analytical method of calculation by correcting the theoretical reference diagram.

On the basis of theoretical studies on the analysis of thermodynamic processes of internal combustion engines operating on biodiesel, we managed to find out the following.

Engines operating on biodiesel provide a reduction in the average pressure of the theoretical cycle and the effective engine power compared to engines operating on petroleum fuel. This is due to the fact that biodiesel fuel has a lower heat transfer compared with diesel fuel. Biofuels, which contain 12% oxygen, require the least amount of air during combustion in compression ignition engines than during combustion of diesel fuel. When refueling engines with compression ignition by biodiesel, maintaining the projected nominal power will be ensured by increased specific fuel consumption compared to refueling engines with compression ignition operating on diesel fuel.

diesel fuel, emission of gas, combustibles, gas of escapements, tractor engines, excess air coefficient, residual gas temperature

Одержано (Received) 20.10.2018

Прорецензовано (Reviewed) 6.11.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 631.312; 631.316.22

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.12-21>

С.М. Лещенко, доц., канд. техн. наук, **В.М. Сало**, проф., д-р техн. наук, **Д.І. Петренко**, доц., канд. техн. наук, **О.М. Васильковський**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м Кропивницький, Україна
e-mail: serafsgm@ukr.net

Вплив конструктивно-технологічних параметрів робочих органів глибокорозпушувача на тяговий опір

В роботі оцінюється вплив конструктивно-технологічних параметрів робочих органів комбінованих глибокорозпушувачів на тяговий опір агрегатів. Доводиться, що використання раціональної формули Горячкіна для аналітичного визначення тягового опору глибокорозпушувачів, у традиційному її представленні є недоречним, оскільки чизельні агрегати здійснюють принципово іншу технологічну операцію порівняно з полицевим плугом. Запропоновано методику визначення тягового опору чизельних знарядь з врахуванням зон деформацій від конструктивних елементів чизельних лап. З практичної точки зору проаналізовано вплив деяких конструктивних елементів глибокорозпушувача на питомий опір ґрунту та проведено оцінку витрати пального в залежності від комплектування агрегату.
тяговий опір, раціональна формула Горячкіна, чизельний глибокорозпушувач, додаткові деформатори, витрати пального

С.Н. Лещенко, доц., канд. техн. наук, **В.М. Сало**, проф., д-р техн. наук, **Д.И. Петренко**, доц., канд. техн. наук, **А.М. Васильковский**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Влияние конструктивно-технологических параметров рабочих органов глибокорыхлителя на тяговое сопротивление

В работе оценивается влияние конструктивно-технологических параметров рабочих органов комбинированных глибокорыхлителей на тяговое сопротивление агрегатов. Доказывается, что использование рациональной формулы Горячкина для аналитического определения тягового сопротивления глибокорыхлителей, в традиционном ее представлении является неуместным, поскольку чизельные агрегаты осуществляют принципиально иную технологическую операцию по сравнению с отвальным плугом. Предложена методика определения тягового сопротивления чизельных орудий с учетом зон деформаций от конструктивных элементов чизельных лап. С практической точки зрения проанализировано влияние некоторых конструктивных элементов глибокорыхлителя на удельное сопротивление почвы и проведена оценка расхода топлива в зависимости от комплектации агрегата.
тяговое сопротивление, рациональная формула Горячкина, чизельный глибокорыхлитель, дополнительные деформаторы, расход топлива

Постановка проблеми. Поступовий перехід від технологій класичної полицевої оранки до технологій безполицевого глибокого обробітку є реаліями сьогодення. Впровадження в технологічні процеси вирощування продукції рослинництва на етапах основного обробітку ґрунту процесів глибокого розпушування, дозволяють суттєво скоротити витрати на проведення операцій, зруйнувати ущільнену підорну підшву, цим самим покращити інфільтраційні властивості ґрунтів, скоротити прояви вітрової та водної ерозій, і зрештою, слугують основами ґрунтозахисного енергоощадного землеробства. Існують суттєві перепони щодо активного впровадження глибокого

розпушування ґрунтів у агровиробництво, насамперед, в умовах дрібних та середніх фермерських господарств. Це пов'язано із обмеженою кількістю глибокорозпушувачів та інших машин для безполицевого обробітку ґрунту, що є адаптованими до ґрунтово-кліматичних умов України та можуть ефективно агрегатуватися із малопродуктивними тракторами, насамперед вітчизняного виробництва і застарілими енергетичними засобами. Ще одним фактором, який обмежує використання глибокорозпушувачів є висока вартість закордонних машин та запасних частин до них, що реалізуються на ринку сільськогосподарської техніки, а вітчизняні виробники здебільшого необґрунтовано копіюють будову закордонних аналогів без вдосконалення конструкцій та їх адаптації до ґрунтових умов, експлуатаційних особливостей енергетичних засобів, специфіки реалізацій технологій глибокого розпушування.

Протягом останніх років місцевими виробниками робляться спроби вдосконалити як окремі елементи конструкцій глибокорозпушувачів, так і їх принципових схем і механізмів регулювань загалом, що повинно підвищити загальну ефективність їх використання, спростити та обґрунтувати конструктивно-технологічні параметри і режими роботи та забезпечити комплектування агрегатів із існуючими енергетичними засобами. Для комплексної оцінки якісних показників роботи, витрат енергії, ефективного агрегування, пошуку раціональних конструкцій та набору робочих органів проводяться відповідні теоретико експериментальні дослідження, хоча ряд питань залишаються не вивченими. Зокрема, актуальними питаннями залишаються питання взаємозв'язку якості операцій глибокого розпушування із енерговитратами та можливість комплектування ефективного ґрунтообробного агрегату із раціональним набором робочих органів з тракторами різного тягового класу та конструкціями енергетичних засобів.

На кафедрі сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету розроблено сімейство комбінованих чизельних глибокорозпушувачів, які можуть агрегатуватися із тракторами як вітчизняного, так і закордонного виробництва різного тягового класу, попередні дослідження яких [3, 5, 10-19] підтвердили їх високу ефективність під час роботи на важких суглинкових і глинистих ґрунтах Центральної України. Сьогодні залишається відкритим питання комплексної оцінки ефективності роботи запропонованих ґрунтообробних агрегатів з точки зору затрат енергії та взаємозв'язку енерговитрат із якістю обробітку ґрунту.

Аналіз основних досліджень і публікацій. На практиці прийнято затрати енергії на обробіток ґрунту оцінювати дійсними витратами пального. Крім того, відомо, що витрати пального на обробіток ґрунту суттєво залежать не лише від конструктивних особливостей робочих органів і знарядь ґрунтообробних машин та їх компоновки у агрегати, але і від типу та фізико-механічних властивостей ґрунтів, що підлягають обробці. Відомо, що питома робота (кДж/м^3) під час оранки класичним полицевим плугом складає: на піщаних ґрунтах – 30 ± 5 , на важкоглинистих 120 ± 20 ; для глибокого розпушування ґрунту за аналогічних умов – 20 ± 4 та 80 ± 10 кДж/м^3 відповідно, що повністю підтверджує можливість зниження витрат енергії, а отже і пального, під час глибокого розпушування ґрунту у 1,5 рази порівняно із оранкою [2, 4, 9].

Хоч і однозначно доведена можливість скорочення енерговитрат під час глибокого розпушування ґрунту у порівнянні з класичною оранкою, прямий вплив на енерговитрати мають геометричні параметри робочих органів глибокорозпушувачів, їх компоновка у принципову схему машини, а підбір раціональних параметрів має вирішити проблему узгодження величини тягового опору із кінцевою якістю операції. В будь-якому випадку, на етапі проектування глибокорозпушувачів необхідно оцінити

кількість енергії яку потрібно витратити для подолання тягового опору під час розпушування та яку якість операції при даному наборі робочих органів можна отримати. Неодноразово доведено [1-9], що під час глибокого безполицевого обробітку ґрунту зниження тягового опору, в більшості випадків, неминуче призводить до зниження якісних показників роботи і навпаки. Отже під час проектування комбінованих чизельних глибокорозпушувачів, як і інших комбінованих агрегатів для безполицевого обробітку ґрунту, слід чітко визначитися із домінуючими характеристиками робочих органів, як поєднання окремих конструктивних елементів ґрунтообробних агрегатів будуть впливати на якість обробітку за різних ґрунтово-кліматичних умов та оцінити витрати енергії під час технологічного процесу, що дозволить ефективно скомпонувати ґрунтообробний агрегат [4, 9].

Під час визначення тягового опору плугів прийнято використовувати формулу В.П. Горячкіна [9]:

$$R_x = R_1 + R_2 + R_3 = f \cdot G + k_0 \cdot a \cdot b \cdot n + \varepsilon \cdot a \cdot b \cdot n \cdot V^2, \quad (1)$$

де R_1 , R_2 , R_3 – опори першої, другої та третьої категорій;

f – коефіцієнт пропорційності (опір перетягуванню плуга у відкритій борозні), при роботі полицевого плуга по стерні $f = 0,5$; для чизельних плугів $f = 0,4$ [9];

G – сила ваги;

k_0 – питомий опір ґрунту, за В.П. Горячкіним: на легких ґрунтах $k_0 = 2$ Н/см² (20 кПа), на середніх – $k_0 = 3$ Н/см² (30 кПа) і на важких – $k_0 = 4...5$ Н/см² (40...50 кПа) [9];

a та b – відповідно глибина обробки та ширина захвату робочого органу;

n – кількість корпусів чи лап на знарядді;

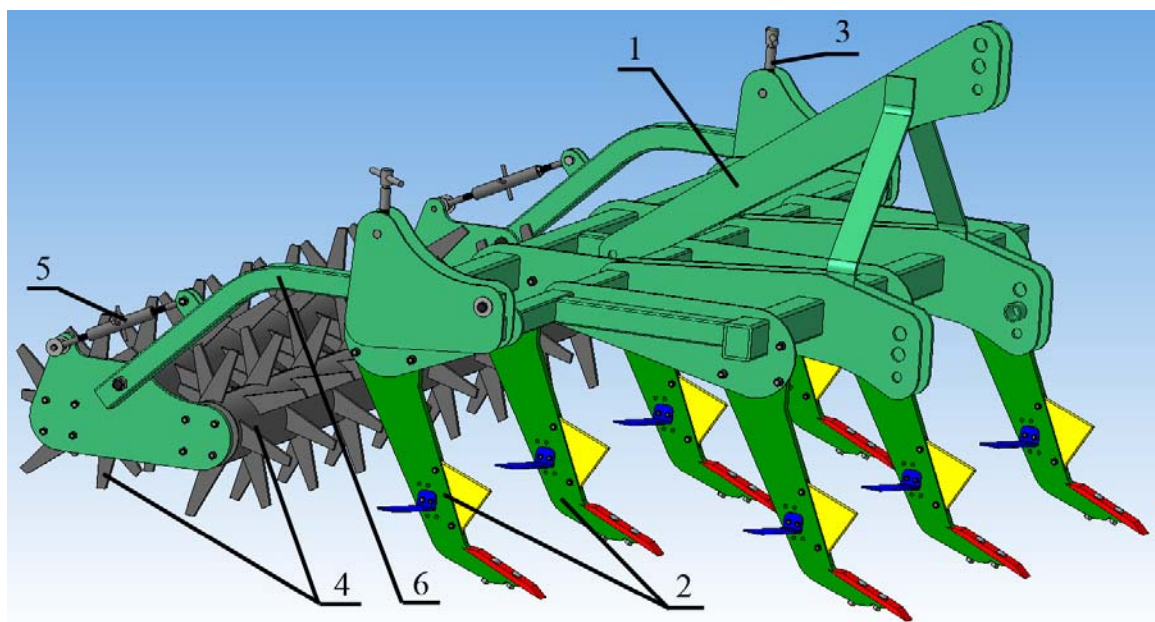
ε – коефіцієнт швидкісного опору, який залежить від параметрів (геометричної форми) робочого органу та властивостей ґрунту, за В.П. Горячкіним $\varepsilon = 1500...2000$ Н·с²/м⁴ [9];

V – швидкість орного агрегату.

Більшість дослідників доводять [3-9, 19], що глибокорозпушувачі, зокрема чизельні, під час роботи здійснюють принципово інший процес порівняно з плугом. Основна різниця полягає в тому, що полицевий плуг забезпечує суцільний обробіток на повну глибину ходу робочих органів із повним чи частковим обертанням вирізаної скиби, тоді як чизельні глибокорозпушувачі забезпечують розпушування ґрунту без обертання скиби із утворенням незруйнованих гребенів на дні борозни (недоріз скиби). Для усунення вказаного недоліку ряд дослідників [6-14] додатково на стояку чизельних лап пропонують встановлювати різні активатори у вигляді закрилок, крил чи інших елементів, які деформують ґрунт, переважно у горизонтальній площині, і залежно від глибини їх розміщення відносно долота, можуть або ж підрізати коріння рослин (встановлені близько до поверхні), або ж частково вирівнювати дно борозни (розміщені близько до носка долота). Незважаючи на прагнення розробників за рахунок вдосконалення конструкції чизельних лап шляхом встановлення додаткових вертикальних деформаторів для часткового вирівнювання дна борозни, саме нерівномірний обробіток такими робочими органами за глибиною не дозволяє повноцінно використати раціональну формулу В.П. Горячкіна (1) для визначення тягового опору глибокорозпушувачів.

Постановка завдання. Виходячи із наведеного, метою даної роботи є дослідження впливу конструктивно-технологічних параметрів робочих органів глибокорозпушувача на тяговий опір і оцінка витрат пального залежно від компоновки агрегату та набору робочих органів під час роботи комбінованих чизельних агрегатів.

Виклад основного матеріалу. На кафедрі сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету розроблено конструкцію комбінованого чизельного глибокорозпушувача [10-19] (рис. 1), який призначено для розпушування важких та середніх ґрунтів, як у весняний, так і осінній період та часткового закриття в ґрунт органічних та мінеральних добрив. Залежно від конструктивної ширини захвату глибокорозпушувач може агрегуватися з тракторами тягового класу від 2 до 5. За способом агрегування комбінований чизельний глибокорозпушувач є начіпною машиною, яка здатна якісно виконувати технологічний процес на полях з нахилом місцевості до 8° , на ґрунтах при вологості до 27% та твердості до 5 МПа. Глибокорозпушувач має оригінальну зварну раму високої жорсткості з пустотілих брусів та металевих пластин з трирядним нерівномірним розташуванням робочих органів. З'єднання чизеля з трактором виконується за допомогою триточкової навісної системи.



1 – рама; 2 – лапа чизельна; 3 – механізм регулювання глибини; 4 – спарені зубчасті котки;
5 – гвинтова стяжка; 6 – кронштейн кріплення котка

Рисунок 1 – Загальний вигляд комбінованого чизельного глибокорозпушувач
Джерело: розроблено авторами з використанням [1-9]

Основні робочі органи глибокорозпушувача – чизельні лапи з шириною захвату долота 50 мм, які мають індивідуальне кріплення та можуть розпушувати ґрунт на глибину до 60 см. Зуб, розташований в передній частині стояка, забезпечує перерізання крупних грудок, які можуть відриватися від суцільного ґрунтового масиву долотом. Плоскорізальні крила, закріплені по боках стояків, також призначені для додаткового розпушування ґрунту, можуть установлюватися на різній відстані від долота залежно від заданої глибини обробітку та їх функціонального призначення.

Додаткові робочі органи чизельного глибокорозпушувача-удобрювача – зубчасті котки 4, які виконують кілька функцій, а саме – інтенсивне розпушування та вирівнювання попередньо зрушеного лапами ґрунту та виконання функцій опорного елемента для встановлення глибини обробітку основними робочими органами – чизельними лапами. Зубчасті котки розташовані позаду чизельних лап на всю ширину машини. Гвинтова стяжка 5 регулювання положення котків, залежно від задач обробітку та стану ґрунту, дозволяє змінювати інтенсивність роботи кожного з котків, змінюючи їх взаємне положення в вертикальній площині. Переведення чизеля з робочого в транспортне положення здійснюється з кабіни гідросистемою трактора.

Механізмом регулювання глибини ходу є гвинтова пара 3. Під час закручування або викручування цих гвинтів змінюється положення котків при роботі відносно рами. Один повний оберт гвинта відповідає зміні глибини обробітку ґрунту на 15 мм.

Проведено ряд теоретичних та експериментальних досліджень розробленого чизельного агрегату [12-19], які підтверджують його високу ефективність роботи, проте питання зміни тягового опору та витрат енергії на глибокий безполицевий обробіток залишається вивченим недостатньо.

Авторами запропоновано визначити площу поперечного перерізу скиби, яку обробляє чизельна лапа, та підставити її в формулу В.П. Горячкіна, що дозволить розрахувати тяговий опір чизельного глибокорозпушувача. В такому випадку формулу (1) можна записати наступним чином

$$R_x = f \cdot G + F(k_0 \cdot n + \varepsilon \cdot n \cdot V^2),$$

де F – площа перерізу обробленого ґрунту у поперечно-вертикальній площині. Ця площа є сумою площ прямокутника від проекції виступаючої частини долота на поперечно-вертикальну площину та трапеції, обмеженої проекціями бокових крил чизельної лапи:

$$F = l_d \cdot b_d + \frac{1}{2}(b_d + b_k)(l_k - l_d),$$

де l_d , l_k , b_d , b_k – проекції довжини і ширини виступаючої частини долота і крил відповідно.

Тоді з врахуванням обробленої площі ґрунту однією чизельною лапою з крилами загальна формула для визначення тягового опору має вигляд:

$$R_x = f \cdot G + \left(l_d \cdot b_d + \frac{1}{2}(b_d + b_k)(l_k - l_d) \right) (k_0 \cdot n + \varepsilon \cdot n \cdot V^2).$$

З іншої точки зору, на основі цієї ж раціональної формули В.П. Горячкіна для відвальних плугів та її інтерпретації В.В. Труфанова для плоскорізних знарядь [7], яка враховує лише суму статичних сил і сил тертя була доповнена динамічна складова. Після проведення перетворень отримано рівняння опору чизельного робочого органу із прямим стояком і додатковими горизонтальними деформаторами, що враховує нормальні сили, сили тертя, швидкість руху МТА і інші фактори:

$$\begin{aligned} R_x = & \sum (N_r + N_c + N_k) + \\ & + \sum [fG + f_1(N_r + N_c + N_k) + 2f_b(R_{rb} + R_{bc} + R_{bk})] + \\ & + (K + \varepsilon_d V^2 + \varepsilon_k V^2)(Bh_b + Sh_d + Sh_k), \end{aligned}$$

де N_r – горизонтальні складові сил, що діють на долото;

N_C, N_K – опори переміщення стояка і крил відповідно (лобовий опір);

fG – сила тертя по дну борозни;

$f_1(N_F + N_C + N_K)$ – горизонтальна складова сил тертя від нормальних сил;

$2f_B(R_{FB} + R_{BC} + R_{BK})$ – горизонтальні та бокові складові сил тертя на бокових площинах долота стояка та крил відповідно;

K – коефіцієнт, який характеризує здатність ґрунту протидіяти деформації;

$\varepsilon_D, \varepsilon_K$ – коефіцієнти, що залежать від форми робочої поверхні долота і крил відповідно, властивостей і розміру ґрунтового перетину, що деформується відповідними елементами;

$Bh_B + Sh_D + Sh_K$ – сума активних площ стояка, долота і крил.

З метою експериментального вивчення впливу конструктивно-технологічних параметрів глибокорозпушувача на тяговий опір проводили його вимірювання за різних умов роботи методом прямого динамометрування. Результати замірів представлені у вигляді тривимірного графіку взаємного впливу обраних параметрів на питомий опір (рис. 2). Отримані результати доводять, що збільшення глибини обробки забезпечує підвищення тягового опору, незалежно від відстані між робочими органами. Зважаючи на проведені експерименти можна відмітити, що рекомендовані значення питомого опору, за умов забезпечення заданої якості, перебувають у діапазоні 14...16 кН/м, що для глибини чизелювання 30...40 см забезпечується при відстані між робочими органами 50...60 см.

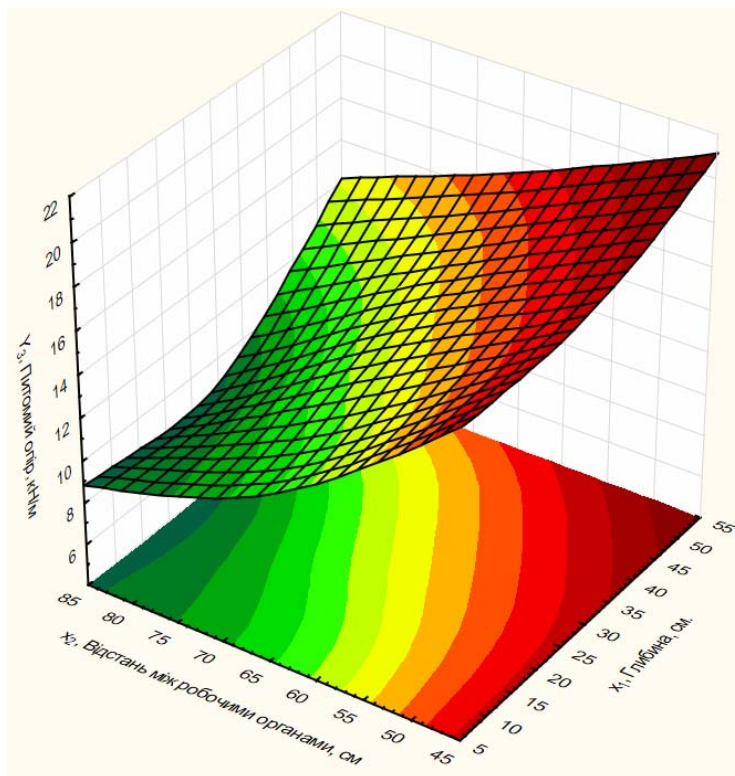


Рисунок 2 – Графік впливу глибини обробки і відстані між робочими органами на питомий опір
Джерело: розроблено авторами

Суттєвим показником ефективності роботи ґрунтообробного агрегату є його витрати пального за умов забезпечення агротехнічних вимог до операції. Проведені заміри витрат пального під час використання комбінованих чизельних глибокорозпушувачів розробки ЦНТУ, при їх роботі в складних ґрунтових умовах [19] та проведено порівняння цих витрат із іншими агрегатами аналогічного призначення. Слід відмітити, що середні витрати пального агрегатів як на основі вітчизняних тракторів типу ХТЗ, ЮМЗ, так і закордонних John Deere, New Holland, із розробленими глибокорозпушувачами різної ширини захвату при глибині роботи 35...40 см із середнім якісним показником кришення ґрунту 70...75% в умовах важких і середніх суглинків із ущільненою підорною підшоною не перевищували 18...20 л/га. В той час, як ґрунтообробні агрегати на базі глибокорозпушувачів Gaspardo Artiglio, які являються одними з кращих існуючих закордонних машин на вітчизняному ринку сільськогосподарської техніки, при глибині роботи 30...35 см витрачали 20...24 л/га пального, причому якісний показник їх роботи в умовах Центральної України не перевищував 55...60%.

Висновки:

1. Для комплексної оцінки якісних показників роботи, витрат енергії, ефективного агрегування, пошуку раціональних конструкцій та набору робочих органів комбінованих чизельних глибокорозпушувачів проводяться відповідні теоретико експериментальні дослідження, хоча ряд питань залишаються не вивченими.

2. Для більш ефективного визначення тягового опору комбінованого чизельного глибокорозпушувача запропоновано визначити площу поперечного перерізу скиби, яку обробляє чизельна лапа з врахуванням її додаткових конструктивних елементів (долота і крил).

3. На основі формули Труфанова для плоскорізних знарядь, яка враховує лише суму статичних сил і сил тертя була доповнена динамічна складова, отримано рівняння опору чизельного робочого органу із прямим стояком і додатковими горизонтальними деформаторами, що враховує нормальні сили, сили тертя, швидкість руху МТА і інші фактори.

4. Керуючись отриманими експериментальними даними можна стверджувати, що рекомендовані значення питомого опору, за умов забезпечення заданої якості, перебувають у діапазоні 14...16 кН/м, що для глибини чизелювання 30...40 см забезпечується при відстані між робочими органами 50...60 см.

5. Середні витрати пального агрегатів як на основі вітчизняних тракторів типу ХТЗ, ЮМЗ так і закордонних John Deere, New Holland, із розробленими глибокорозпушувачами різної ширини захвату при глибині роботи 35...40 см із середнім якісним показником кришення ґрунту 70...75% на переущільнених ґрунтах із ущільненою підорною підшоною не перевищували 18...20 л/га.

Список літератури

1. Пашенко В.Ф., Корниенко С.И., Гусаренко Н.П. Теория воздействия рабочих органов орудий на почву: монография. Харьков : ХНАУ, 2013. 90 с.
2. Машини для обробітку ґрунту та внесення добрив: навч. посіб. для студ. агротехн. спец. / Сало В.М. та ін. Харків: Мачулін, 2016. 244 с.
3. Вітчизняне технічне забезпечення сучасних процесів у рослинництві / В.М. Сало, Д.В. Богатирьов, С.М. Лещенко, М.І. Савицький. *Техніка і технології АПК*, 2014. № 10 (61). С. 16-19.
4. Панов И.М., Ветехин В.И. Физические основы механики почв: монография. Киев: Феникс, 2008. 266 с.

5. Сало В.М., Лещенко С.М., Пашинський В.А., Ярових Р.В. Аналіз процесів чизелювання ґрунтів з застосуванням різних комбінацій робочих органів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* Кіровоград, 2015. Вип. 45, Ч.1. С. 126-132.
6. Борисенко И.Б. Совершенствование ресурсосберегающих и почвозащитных технологий и технических средств обработки почвы в острозасушливых условиях нижнего Поволжья: дис...д-ра техн. наук: 05.20.01. Волгоград, 2006. 402 с.
7. Руденко Н.Е. Механизация обработки почвы: учебное пособие. Ставрополь: Изд-во СтГАУ «АГРУС», 2005. 112 с.
8. Божко, И.В., Пархоменко Г.Г. Особенности безотвальной посллойной обработки почвы в засушливых условиях. *Агротехника и энергообеспечение: научно-практический журнал.* Орел, 2014. № 1(1). С. 25 – 30.
9. Сисолін П.В., Сало В.М., Кропівний В.М. Сільськогосподарські машини : теоретичні основи, конструкція, проектування: підруч. для студ. вищ. навч. закл. із спец. «Машини та обладнання с.-г. вир-ва». Кн. 1: Машини для рільництва / За ред. М.І. Чорновола. Київ: Урожай, 2001. 384 с.
10. Лещенко С.М., Сало В.М. Технічне забезпечення збереження родючості ґрунтів в системі ресурсозберігаючих технологій. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб..* Кіровоград, 2013. Вип. 43, ч.1. С. 96-102.
11. Лещенко С. В. Сало, А. Васильковский Состояние вопроса и перспектива интенсификации работы чизельных орудий с целью сохранения естественного плодородия. *MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery.* Vol. 16 - №2, Lublin – Rzeszów: Polish Academy of Sciences, 2014. P. 195–201.
12. Leschenko S., Salo V., D. Petrenko Experimental estimate of the efficiency of basic tilling by chisel equipment in the conditions of soil. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. .* Кіровоград, 2014. Вип. 44. С. 237-243.
13. Лещенко С.М., Сало В.М., Петренко Д.І. Експериментальна оцінка якості роботи комбінованого чизеля з додатковими горизонтальними та вертикальними деформаторами. *Вісник Харківського національного технічного університету ім. П. Василенка.* Харків, 2015. Вип. 156. С. 25–34.
14. Лещенко С.М., Сало В.М., Петренко Д.І., Лісовий І.О. Вплив конструктивних параметрів чизельної лапи глибокорозпушувача на деформацію ґрунту. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти.* Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2016. Вип. 4. С. 115-124.
15. Сало В., Лещенко С. Технічне забезпечення процесів глибокого розпушування ґрунту. *Пропозиція: укр. журн. з питань агробізнесу: інформ. щомісяч.,* 2015. № 10. С.122-124.
16. Лещенко С.М., Сало В.М. Обґрунтування доцільності проведення глибокого чизельного рихлення на переуцільнених та ерозійно-небезпечних ґрунтах. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту.* Кіровоград: КНТУ, 2015. Вип. 28. С. 181-186.
17. Vasylovskaya K.V., Leshchenko S.M., Vasylovskiy O.M., Petrenko D.I. Improvement of equipment for basic tillage and sowing as initial stage of harvest forecasting. *INMATEH-Agricultural Engineering.* 2016. Vol.50, No.3. P.13-20 ref.18.
18. Лещенко С. М., Сало В. М. Шляхи підвищення ефективності роботи комбінованих чизельних ґрунтообробних знарядь з додатковими деформаторами. *Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодерж. зб.* Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2016. Вип. №4 (103). С. 31-37.
19. Лещенко С.М., Сало В.М., Петренко Д.І. Оцінка енергоємності глибокого обробітку ґрунту комбінованими чизельними глибокорозпушувачами. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту.* Кропивницький: КНТУ, 2018. Вип. 31. С. 10–20.

References

1. Pashchenko, V.F., Korniyenko, N.P., Husarenko, S.Y. (2013). Teoriya vozdeistviya rabochykh orhanov orudyi na pochvu. [Theory of the impact of the working bodies of guns on the soil.]. Kharkov : KhNAU [in Russian].

2. Salo, V.M., Leshchenko, S.M., Luzan, P.H., Machok, Yu.V., Bohatyrov, D.V. (2016). Mashyny dlia obrobittu gruntu ta vnesennia dobryv. [Machines for cultivating soil and fertilizing]. Kharkiv : Machulin [in Ukrainian].
3. Salo, V.M., Bohatyrov, D.V., Leshchenko, S.M., Savytskyi, M.I. (2014). Vitchyzniane tekhnichne zabezpechennia suchasnykh protsesiv u roslinnytstvi [Domestic technical support of modern processes in plant growing] *Tekhnika i tekhnolohii APK. Doslidnytske: UKRNDIPVT im. L. Pohoriloho, Vol. 10 (61)*, 16-19 [in Ukrainian].
4. Panov, Y.M., Vetokhyn, V.Y. (2008). Fyzycheskye osnovy mekhaniky pochv. [Physical bases of soil mechanics]. Kiev: Fenyks [in Russian].
5. Salo, V.M., Leshchenko, S.M., Pashynskiy, V.A., Yarovykh, R.V. (2015). Analiz protsesiv chyzeliuvannia gruntiv z zastosuvanniam riznykh kombinatsii robochykh orhaniv [Analysis of the processes of chiseling soils with the use of various combinations of working bodies]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn. Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi nauko-tekhnichnyi zbirnyk. Kirovohrad, Vol. 45, Ch.1*, 126-132 [in Ukrainian].
6. Borysenko, Y.B. (2006). Sovershenstvovanye resursoberehaiushchykh y pochvozashchytnikh tekhnolohiy y tekhnicheskikh sredstv obrabotky pochvi v ostrozashlyvikh usloviyakh nyzhnego Povolzhia [Improving resource-saving and soil-protective technologies and technical means of tillage in the arid dry conditions of the lower Volga region]. Doctor's thesis. Volhohrad [in Russian].
7. Rudenko, N.E. (2005). Mekhanizatsiya obrabotky pochvi [Mechanization of soil tillage]. Stavropol: Yzd-vo StHAU «AHRUS» [in Russian].
8. Bozhko, Y.V., Parkhomenko, H.H. (2014). Osobennosti bezotvalnoi posloinoi obrabotky pochvi v zasushlyvikh usloviyakh [Features of the soilless layered tillage in dry conditions]. *Ahrotekhnika y enerhoobespechenye: Nauchno-praktycheskyi zhurnal, Vol. 1(1)*, 25-30 [in Russian].
9. Sysolin, P.V., Salo, V.M., Kropivnyi, V.M. (2001). Silskohospodarski mashyny: teoretychni osnovy, konstruktsiia, proektuvannia [Agricultural machines: theoretical foundations, design, design]. Kn. 1: Mashyny dlia rilnytstva. Kyiv: Urozhai [in Ukrainian].
10. Leshchenko, S.M., Salo, V.M. (2013). Tekhnichne zabezpechennia zberezhenntia rodiuchosti gruntiv v systemi resursozberihaiuchykh tekhnolohii [The technical providing maintainance of fertility soils is in the system of keepings technologies]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn. Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi nauko-tekhnichnyi zbirnyk. Kirovohrad, Vol. 43, ch.1*, 96-102 [in Ukrainian].
11. Leshchenko, S., Salo, V., Vasylovskiy, A. (2014). Sostoianye voprosa i perspektyva intensyfykatsyy raboti chyzelnikh orudyi s tseliu sokhraneniya estestvennoho plodorodiya [Condition of the question and perspective of the intensification of work of diesel tools for the purpose of preserving natural fertility]. *MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery, Vol. 16, 2*, 195–201 [in Russian].
12. Leshchenko, S., Salo, V., Petrenko, D. (2014). Experimental estimate of the efficiency of basic tilling by chisel equipment in the conditions of soil. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn. Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi nauko-tekhnichnyi zbirnyk, Vol. 44*, 237-243 [in English].
13. Leshchenko, S.M., Salo, V.M., Petrenko, D.I. (2015). Eksperymentalna otsinka yakosti roboty kombinovanoho chyzelia z dodatkovymy horyzontalnymy ta vertykalnymy deformatoramy [Experimental performance evaluation chisel combined with extra horizontal and vertical warp]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu im. P. Vasylenka, Vol. 156*, 25–34 [in Ukrainian].
14. Leshchenko, S.M., Salo, V.M., Petrenko, D.I., Lisovy, I.O. (2016). Vplyv konstruktivnykh parametriv chyzelnoi lapy glybokorozpushuvacha na deformatsiiu gruntu [Influence of design specifications of chisel shank of a deep tiller on soil deformation]. *Visnyk Ukrainskoho viddilennia Mizhnarodnoi akademii ahrarnoi osvity, Vol. 4*, 115-124 [in Ukrainian].
15. Salo, V., Leshchenko, S. (2015). Tekhnichne zabezpechennia protsesiv hlybokoho rozpushuvannia gruntu [Technical support processes of deep soil loosening]. *Propozytsiia: ukrainskyi zhurnal z pytan ahrobiznesu. Informatsiinyi shchomisiachnyk, Vol.10*, 122-124 [in Ukrainian].
16. Leshchenko, S.M., Salo, V.M. (2015). Obgruntuvannia dotsilnosti provedennia hlybokoho chyzelnoho rykhlennia na pereushchilnennykh ta eroziino-nebezpechnykh gruntakh [Justification feasibility of deep loosening on chisel compaction and erosion-hazardous soils]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia, Vol. 28*, 181-186 [in Ukrainian].

17. Vasylovskaya, K.V., Leshchenko, S.M., Vasylovskiy, O.M., Petrenko, D.I. (2016). Improvement of equipment for basic tillage and sowing as initial stage of harvest forecasting. *INMATEH-Agricultural Engineering*, Vol. 50, 3, 13-20 [in English].
18. Leshchenko, S.M., Salo, V.M. (2016). Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti roboty kombinovanykh chyzelnykh gruntoobrobnykh znariad z dodatkovymy deformatoramy [The ways of improvement of the operation efficiency of combined chisel tilling equipment with additional deformers]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva: [zahalnoderzhavnyi zbirnyk]*, Vol. 4 (103), 31-37 [in Ukrainian].
19. Leshchenko, S.M., Salo, V.M., Petrenko, D.I. (2018). Otsinka enerhoiemnosti hlybokoho obrobtku gruntu kombinovanykh chyzelnymy hlybokorozpushuvachamy [Assessment of energy intensity of deep cultivation of soil by combined chisel deep tillers]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia*, Vol. 31, 10-20 [in Ukrainian].

Sergiy Leshchenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Salo**, Prof., DSc., **Dmytro Petrenko**, Assos. Prof., PhD tech. sci., **Oleksii Vasylovskiy**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Influence of Structural and Technological Parameters of the Operating Elements of a Deep Tiller on Ploughing Resistance

The influence of structural and technological parameters of operating elements of combined deep tillers on the ploughing resistance of the components has been assessed in the article.

The objective of the work is to study the influence of the structural and technological parameters of the operating elements of a deep tiller on the ploughing resistance and the estimation of fuel consumption, depending on the configuration of the unit and the set of operating elements during the operation of the combined chisel assemblies.

It has been proved that the application of Goryachkin's rational formula for the analytical determination of the ploughing resistance of deep tillers, in its traditional presentation, is inappropriate, since chisel components undertake a fundamentally different technological operation in comparison with the moldboard plow. The methodology of identification of the ploughing resistance of chisel devices, taking into account deformation zones from constructive elements of chisel tips, was suggested. We received the equation of the resistance of a chisel operating element with the direct stand and additional horizontal deformers, taking into account normal forces, frictional forces, speed of the machine and tractor assembly, and other factors.

On the basis of the experimental data, the influence of some structural elements of the deep tiller on the specific resistance of soil was analyzed and the fuel consumption has been estimated depending on the assembly of the device.

ploughing resistance, Goryachkin's rational formula, chisel deep tiller, additional deformers, fuel consumption

Одержано (Received) 12.10.2018

Прорецензовано (Reviewed) 20.11.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 631.33

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.22-35>**К.В. Васильковська**, канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: vasilkovskakv@ukr.net*

Системний аналіз конструкцій пневмомеханічних висівних апаратів для точного висіву насіння просапних культур

Аналіз найбільш поширених конструкцій висівних апаратів для точного висіву просапних культур дозволив встановити, що на сьогоднішній день найбільш розповсюдженими є пневмомеханічні висівні апарати, які можуть бути дисковими або барабанными – за конструктивним виконанням та вакуумними або надлишкового тиску – за способом підведення повітря.

Найбільш розповсюдженими є дискові висівні апарати вакуумної дії, які мають відносно малі габарити, що дозволяє розмістити їх безпосередньо над сошником без застосування насіннепроводів. Перевагами висівних апаратів з надлишковим тиском повітря порівняно з вакуумними є додаткові важливі функції повітряного потоку, які покращують роботу апарата. Недоліком, притаманним одночасно всім висівним апаратам надлишкового тиску є необхідність герметизації їх насінневих бункерів для зменшення втрат повітря і покращення подачі насіння з бункера в робочу камеру.

Таким чином, проведено системний аналіз найбільш розповсюджених конструкцій висівних апаратів для точного висіву просапних культур, що дасть змогу конструюванню нового досконалого універсального пневмомеханічного висівного апарата.

аналіз конструкцій, просапні сівалки, точний висів, пневмомеханічний висівний апарат, переваги, недоліки

К.В. Васильковская, канд. техн. наук*Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина*

Системный анализ конструкций пневмомеханических высевających аппаратов для точного высева семян пропашных культур

Анализ наиболее распространенных конструкций высевających аппаратов для точного высева пропашных культур позволил установить, что на сегодняшний день наиболее распространенными являются пневмомеханические посевные аппараты, которые могут быть дисковыми или барабанными – по конструктивному исполнению, и, вакуумными или избыточного давления – по способу подвода воздуха.

Наиболее распространенными являются дисковые посевные аппараты вакуумного действия, которые имеют относительно малые габариты, что позволяет разместить их непосредственно над сошником без применения семяпроводов. Преимуществами высевających аппаратов с избыточным давлением воздуха по сравнению с вакуумными есть дополнительные важные функции воздушного потока, которые улучшают работу аппарата. Недостатком, присущим одновременно всем высевających аппаратам избыточного давления – необходимость герметизации их семенных бункеров для уменьшения потерь воздуха и улучшение подачи семян из бункера в рабочую камеру.

Таким образом, проведен системный анализ наиболее распространенных конструкций высевających аппаратов для точного высева пропашных культур, что позволит конструированию нового совершенного универсального пневмомеханического высевającego аппарата.

анализ конструкций, пропашные сеялки, точный высев, пневмомеханический высевający аппарат, преимущества, недостатки

Постановка проблеми. Забезпечення вимог сьогодення – отримання високих врожаїв та зниження витрат на виробництво сільськогосподарської продукції є передумовою точного висіву. Вибір якісного насінневого матеріалу ставить вимогу про чітке дозування насінини до посівного ложа з метою її найкращого там розміщення. Тобто, метою точного висіву є отримання рівномірно розміщених по площі поля рослин, які, в цьому випадку, мають однакову площу живлення та розвиваються найкращим чином. З початку XX сторіччя почався пошук конструкцій висівних апаратів для пунктирної сівби насіння.

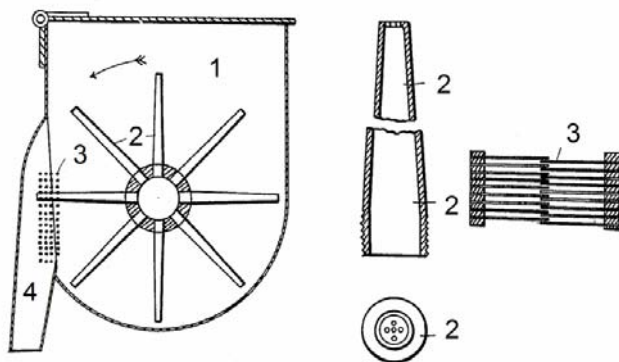
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із перших пневмомеханічних висівних апаратів є висівний апарат з дозатором барабанно-пальцевого типу, заявлений у 1904 році у США (рис. 1) [1].

Представлений пневмомеханічний висівний апарат мав ряд недоліків, таких як ненадійне захоплення насіння завдяки втратам повітря в повітропроводі та пошкодження насіння елементами конструкції при скиданні його в борозну.

Прототипом сучасних пневматичних висівних апаратів з дозаторними дисками є висівний апарат, заявлений у 1916 році у Франції (рис. 2) [1].

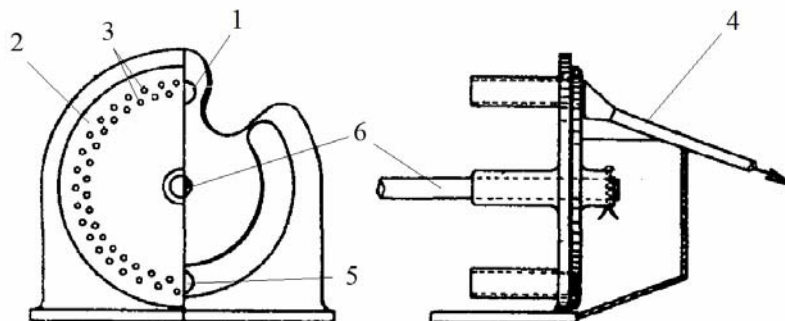
Представлений пневмомеханічний висівний апарат, попри наявність простоти конструкції дозуючого пристрою, не був виготовлений та навіть не мав дослідного зразка, тому що в цей час в Європі йшла I Світова війна. Недоліком цього апарата стало недосконале технічне рішення передачі повітряного потоку на всі апарати сівалки.

Першим у СРСР доведеним до господарчих випробувань став пневмомеханічний висівний апарат, розроблений ВІСГВМом у 1934-1935 рр. за пропозицією інженера І.Л. Слущького [3, 4].



1 – бункер, 2 – пальці, 3 – щітки, 4 – насіннепровід

Рисунок 1 – Загальний вид висівного апарату США, заявленого у 1904 році [1]



1 – вакуумна камера, 2 – висівний диск, 3 – присмоктувальні отвори, 4 – повітропровід;
5 – зона скидання; 6 – приводний вал

Рисунок 2 – Загальний вид висівного апарату Франції, заявленого у 1916 році

Джерело: розроблено на підставі [2]

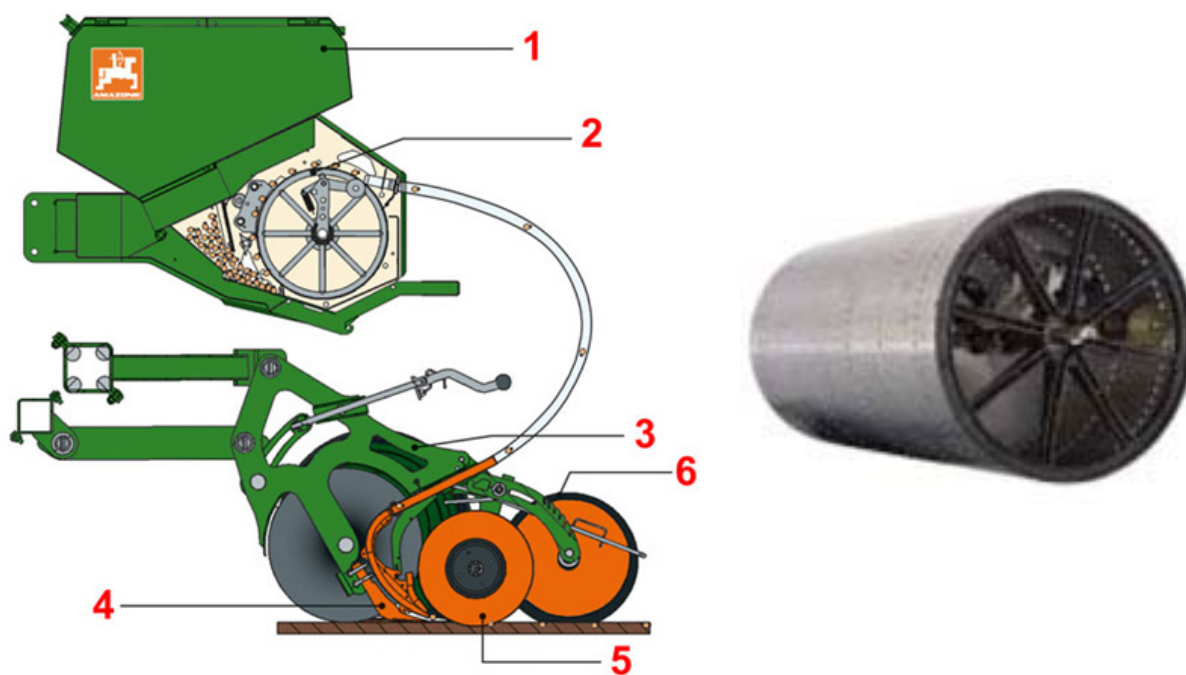
Запропонований у 1933 році барабанний пневмомеханічний висівний апарат вакуумного типу був пристосований для висіву насіння різних культур, але неналежне видалення великої кількості «двійників» та високе конструктивне розташування відносно дна борозни не дало змоги для його широкого використання в сівалках.

Постановка завдання. Аналіз найбільш розповсюджених конструкцій висівних апаратів для точного висіву просапних культур дозволив встановити, що на сьогоднішній день найбільш розповсюдженими є пневмомеханічні висівні апарати, які, попри більшу складність, є більш універсальними і менше пошкоджують насіння елементами конструкцій [3].

Пневмомеханічні висівні апарати можуть бути дисковими або барабанними – за конструктивним виконанням та вакуумними або надлишкового тиску – за способом підведення повітря.

Виклад основного матеріалу. Перерахуємо основні конструкції висівних апаратів провідних виробників сівалок точного висіву та коротко перерахуємо їх характеристики.

Сівалка EDX 9000-T компанії Amazone (рис. 3) [3, 5] здатна працювати на швидкості до 15 км/ч, викликала фурор. На сівалці використовується новітня система висіву у вигляді центрального барабану за допомогою якого здійснюється точний пневматичний висів насіння.



1 – бункер для насіння; 2 – висівний апарат; 3 – дисковий сошник; 4 – борозноутворювач;
5- вловлюючий коточок; 6 – ролики Super-V

Рисунок 3 – Загальний вигляд посівної секції та висівного барабану сівалки Amazone EDX 9000-T
Джерело: [5]

В сівалці використано систему Xpress для модульного дозування та якісного закладання до борозни насінневого матеріалу. Розділення насіння на їх закладання до борозни виконується окремо. Далі насіння через насіннепровід під дією тиску надходить до сошника, де пластиковий вловлюючий коточок приймає насінину не

пошкоджуючи її, та точно вкладає до борозни. Для більш точного закладання насіння в борозну в системі використовується гідравлічне регулювання тиску на сошник.

Оскільки борозноутворювач знаходиться позаду вловлюючого коточка, то якість укладання насіння в борозну залишається постійною, навіть при значній швидкості руху посівного агрегату.

Для насіння кукурудзи, соняшнику та рапсу використовується два насіннєвих барабани, враховуючи великі розміри насіння, для більш точного його дозування.

Налаштування норм висіву здійснюється за допомогою бортового комп'ютера Amatron+.

Барабанний висівний апарат сівалки Amazone EDX 9000-T не знайшов широкого застосування внаслідок невирішеності ряду питань. Основними з них є їх високе конструктивне розташування відносно дна борозни, що призводить до перерозподілу вихідних інтервалів між насінням при їх русі до борозни та значного збільшення їх варіації по довжині рядка. Крім того, внаслідок неефективного видалення зайвого насіння із комірок, для них характерна наявність великої кількості «двійників».

Сівалки Tempo компанії Väderstad (рис. 4) [6] – це високошвидкісна сівалка нового покоління, яка вирізняється точністю і працює вдвічі швидше, ніж традиційні сівалки. Tempo відмінно працює за будь-яких умов – після традиційної чи мінімальної технології обробки ґрунту. Результатом є поява рівномірних та дружніх сходів, що забезпечує якнайкращий старт для росту рослин.

Серце сівалки Tempo – унікальний висівний пристрій Gilstring Seed Meter, що забезпечує відмінну точність на дуже високій швидкості.

Tempo здійснює висів насіння з точністю у трьох вимірах: уздовж, углиб та впоперек. Під дією надлишкового тиску насіння транспортується повітрям від висівного апарата до дна борозни. Технологія точного постілу Power Shoot, яка використовує дію надлишкового тиску повітря, повністю контролює рух насіння від висівного пристрою до його потрапляння в ґрунт, дія сили тяжіння втрачає значення і швидкість руху не впливає на точність розподілу насіння в рядку.



Рисунок 4 – Загальний вигляд посівної секції та висівного апарату сівалки Tempo T компанії Väderstad

Джерело: [6]

Працюючи на високих швидкостях посівного агрегату, апарат не сприймає зміни рельєфу та вібрації, що позитивно впливає на якість посівів. На виході з сім'япроводу насіння зупиняється прижимним колесом, яке зупиняє насіння точно в призначеному місці та вдавлює його у вологий ґрунт. Це забезпечує оптимальний контакт насіння з ґрунтом, а також швидке і рівномірне проростання.

Сівалка здатна висівати насіння кукурудзи, цукрових буряків, сої, ріпаку, бавовника, сорго та інші. Заміна дисків здійснюється за кілька секунд без застосування будь-яких додаткових інструментів.

Перевагами висівного апарату Tempo T є додаткові важливі функції повітряного потоку, які покращують роботу апарата, а саме: видалення зайвого насіння із комірок висівних елементів та пневмотранспортування насіння від висівного диска до дна борозни. А недоліком, притаманним одночасно всім висівним апаратам надлишкового тиску є необхідність герметизації їх насінневих бункерів для зменшення втрат повітря.

Компанія Becker, випускає пневматичні сівалки серії Aeromat (рис. 5) [3, 7] і механічні сівалки Centra.

Сівалка Aeromat – це родина пневмомеханічних сівалок для точного висіву насіння сільськогосподарських культур. Aeromat A – сівалка для точного висіву насіння просапних культур. Забезпечує посів кукурудзи, цукрових буряків, соняшника, гарбуза, сої, квасолі, гороху та інших. Працює на надлишковому тиску. Пунктирне дозування досягається спеціальними висівними дисками. Норма висіву регулюється коробкою зміни передач.



Рисунок 5 – Загальний вигляд посівної секції сівалки Aeromat A компанії Becker

Джерело: [7]

Під час обертання дозуючого диска, насінини по декілька штук заповнюють комірки диска. В момент проходження зони дії повітряного потоку з форсунки одна із насінин утримується в комірці силою тиску повітряного потоку, решта видувається в приймальну камеру висівного пристрою. Необхідності у скидачі зайвого насіння не має, тому що скидання зайвого насіння відбувається за рахунок повітряного потоку. Під дією того ж повітряного потоку насіння потрапляє до борозни, утвореної

сошником. Загортачі загортають насіння, а прикочувальне колесо ущільнює ґрунт для кращого доступу води.

Якісна конструкція сівалки дозволяє здійснювати точний висів, у тому числі й при швидкості руху до 14 км/год.

Однак потрібно відзначити, що висівні апарати Aeromat А компанії Becker є дуже чутливими до форми насіннєвого матеріалу, а саме: висів плескуватого насіння призводить до суттєвого погіршення його якості. До аналогічних наслідків призводить і підвищення частоти обертання диску, при якому суттєво погіршується якість висіву та обмежується його продуктивність.

На ринку України американська компанія Great Plains [3, 7] є присутньою досить недавно. Вона пропонує різноманітний асортимент сівалок для пунктирного висіву.

Сівалка серії 3P3025АН (рис. 6) відрізняється простотою та надійністю у використанні. Просапна сівалка із рамою 9,14 м.

Модель 3P3025АН підвищує стандарти точності та простоти виконання лінійки навісних вертикально-складаних сівалок. Кожна висівна секція обладнана окремим бункером для насіння, 3-секційною системою контактного приводу, серією сошників Great Plains із пневматичною системою Air-Pro®. Все це робить цю сівалку простим та високопродуктивним агрегатом.



Рисунок 6 – Загальний вигляд посівної секції сівалки Great Plains 3P3025АН

Джерело: [7]

Висівна система сівалки здатна точно розмістити насіння в рядку на задану глибину, притиснути кожен насінину до дна утвореної борозни та закрити борозну із необхідним тиском для забезпечення максимального врожаю.

Висока точність висіву досягається за рахунок дозаторів Air-Pro®, які забезпечують виконання технологічного процесу на високих швидкостях, у тому числі й на нерівних ділянках поля.

Висівні апарати сівалки 3P3025АН компанії Great Plains мають відносно малі габарити, що дозволяє розмістити їх безпосередньо над сошником без застосування насіннєпроводів, які найбільш суттєво впливають на перерозподіл вихідних інтервалів між насінням.

Компанія Kverneland пропонує сівалки точного висіву під брендами Accord, Kverneland, Rau.

Універсальна сівалка Accord Optima (рис. 7) [3, 7] з відповідним оснащенням може використовуватися для традиційного і прямого висіву насіння кукурудзи, бобових, соняшника й ін.

Висівний диск обертається разом із вакуумною камерою, що відрізняє цей висівний апарат від аналогів. Це, в свою чергу запобігає втратам вакууму та не потребує великої потужності вентилятора.

Потоком повітря насіння присмоктуються до отворів висівного диска. Зубчастий відсікач запобігає утворенню зайвого насіння. В нижній частині корпусу знаходиться виштовхувач, який також запобігає появі «двійників» при посіві насіння складної форми. Електронний датчик контролює норму висіву й пропуски. У випадку пропусків або відсутності насіння на диску датчик дає сигнал на термінал у кабіні трактора. Висівний диск обертається разом із вакуумною камерою, що відрізняє цей висівний апарат від аналогів. Це, в свою чергу запобігає втратам вакууму та не потребує великої потужності вентилятора. Заслінка у вакуумній камері закриває отвори диска з боку вакуумної камери, що дає змогу насінню потрапити через насіннєпровід до борозни.



1 – вакуумна камера; 2 – відсікач; 3 – заслінка; 4 – виштовхувач; 5 – електронний датчик; 6 – висівний диск; 7 – заслінка вакууму; 8 – відсікач; 9 – кришка; 10 – вакуумний шланг

Рисунок 7 – Загальний вигляд посівної секції та висівного апарата сівалки Accord Optima компанії Kverneland

Джерело: [7]

Напевно найбільшим виробником сівалок точного висіву є французька компанія Quivogne.

Начіпна пневматична сівалка точного висіву Prosem P (рис. 8) [3, 7, 8] обладнана анкерними сошниками. Використовується для посіву цукрових буряків, кукурудзи, гарбуза та сої. Використовується для традиційної технології посіву. Діапазон зміни міжряддь від 33 до 80 мм.

Сівалка має великий насіннєвий бункер 55 літрів об'єму. Використовується дисковий пневмомеханічний висівний апарат вакуумного типу. Норма висіву у висівному апараті регулюється за допомогою роздавальної коробки. Також регулюються вакуум для насіння різних культур та положення селектора для зняття зайвого насіння.



Рисунок 8 – Загальний вигляд посівної секції сівалки Prosem P компанії Quivogne
Джерело: [8]

Застосування V-образних прикочувальних котків дає змогу рівномірно ущільнити ґрунт після посіву.

Висівні апарати сівалки Prosem P компанії Quivogne мають ефективний пристрій для видалення зайвого насіння з присмоктувальних отворів висівного диска і, як правило, забезпечують більш рівномірний вихідний потік насіння.

Продумана концепція пропонованих компанією Kuhn універсальних сівалок точного висіву Maxima і Planter дозволяє використовувати їх при будь-якій технології з різним насіннєвим матеріалом. Відмітними рисами знарядь є більша міцність конструкції, висока надійність і оптимальна точність посіву.

Сівалка Planter (рис. 9) [3, 9] призначена для традиційної сівби. Вона виготовляється із шириною захвату від 3 до 9 м (ємність насіннєвого ящика – 25-45 л). Ширину міжряддя можна міняти від 38 до 80 см. Окремі моделі обладнані резервуаром для мінеральних добрив та розкидачем мікродобрив.

Висів насіння відбувається на однакову глибину, також гарантується однакова відстань між насінням завдяки низькому розташуванню висівного диска. Простота конструкції висівних модулів передбачає висів різних типів насіння за будь якої технології висіву.

Висота розташування висівного апарата, а в свою чергу і висота падіння насіння до борозни менше 10 см та є унікальною. Конструкція кілевидного сошника зменшує швидкість руху насіння вперед при падінні, і цим забезпечує більшу точність розташування насіння у рядку.

Великий діаметр висівного диску подовжує знаходження на ньому присмоктуваного насіння, сприяючи, за допомогою селектора і виштовхувача, усуненню двійників та пропусків.



Рисунок 9 – Загальний вигляд посівної секції сівалки Planter 3 компанії Kuhn

Джерело: [9]

Конструкція висівного апарату сівалки Planter 3 компанії Kuhn має відносно малі габарити, що дозволяє розмістити їх безпосередньо над сошником без застосування насіннєпроводів, відповідно виключивши перерозподіл вихідних інтервалів між насінням.

Massey Ferguson – один з найстаріших сільськогосподарських світових брендів з сімейства американської корпорації AGCO. Massey Ferguson випускає пневматичні сівалки точного висіву в причіпному й начіпному варіантах. Сівалка MF 555 (рис. 10) [3, 8] пропонується в 3-24-рядному виконанні (ширина міжряддя – 70-76 см).



Рисунок 10 – Загальний вигляд посівної секції сівалки MF 555 компанії Massey Ferguson

Джерело: [8]

Massey Ferguson використовує розроблену своїми конструкторами систему дозування (РАМ), що забезпечує висів насіння, а також аплікацію добрив та засобів захисту рослин. Посівна секція працює за рахунок розрідження, використовується вертикальний висівний диск. Насіння у висівному апараті за рахунок повітря просто вдувається до комірок, а потім видувається з них в зоні висіву.

Система дозування насіння надає можливість висіву на великій швидкості посівного агрегату з відповідною точністю розміщення насіння в борозні. Прикочуючи колеса ущільнюють борозну для збереження вологості та надійного проростання насіння.

В конструкції сівалки MF 555 компанії Massey Ferguson не в повній мірі вирішено задачу видалення «двійників» з комірок висівного диску, оскільки не передбачено відповідних пристроїв для її реалізації, а спосіб введення повітряного потоку, що створює надлишковий тиск є недостатньо ефективним.

В асортиментах італійської групи Maschio – широкий вибір пневматичних сівалок для пунктирного посіву просапних та овочевих культур. Їх виробництвом традиційно займається компанія Gaspardo, що входить із 1994 року в групу Maschio. Компанія випускає сівалки багатоцільового призначення в різній комплектації із цільною, телескопічною або шарнірною рамами з можливістю внесення гранульованих мінеральних добрив.

Сівалка Maestra від Gaspardo (рис. 11) [3, 10] призначена для висіву ріпаку, кукурудзи, соняшнику, а також інших просапних культур з мінімізованою втратою насіння. Сівалки, шириною 6-12 м мають 8-24 висівних апарата. Глибина посіву становить 3,5-10 см.



Рисунок 11 – Загальний вигляд посівної секції сівалки Maestra компанії Maschio
Джерело: [10]

Сівалка вакуумна точного висіву є універсальною, обладнана комплектом висівних дисків для різних просапних культур (кукурудза, соняшник, ріпак, соя, сорго, цукрові буряки та ін.).

Поєднання вакуумну в системі гарантує рівномірний розподіл насіння навіть при використанні різнокаліберного насіння та максимальну точність сівби. Посівні секції обладнано подвійними селекторами для скидання зайвого насіння та уникнення висіву двійників.

Зручне перемикання необхідного інтервалу між насінням дозволяє здійснювати висів із заданою точністю. Сівалка забезпечує точний висів на глибині від 3,5 до 10 см.

Висівні апарати сівалки Maestra компанії Maschio майже не мають недоліків, але підвищення нерівномірності висіву насіння при збільшенні колової швидкості висівного диска.

Французька компанія Monosem відноситься до провідних європейських виробників сівалок точного посіву.

Пневматичні сівалки серії NC проводяться у виконанні Classic і Technic (рис. 12) [3, 11] із шириною захвату 3,0-12,6 м (4-16 рядів). Classic – більш проста сівалка, призначена для посіву кукурудзи та соняшника. Оснащена лаповими сошниками. Technic – універсальна сівалка, яка застосовується, крім посіву кукурудзи, та соняшника, ще й для посіву рапсу, цукрових буряків, бобових і ін. Усі сівалки Technic обладнані похило встановленими самоочисними роликми, що прикочують, Farmflex та пристроєм для швидкої зміни глибини висіву.

В сівалках NC Technic використовується висівний апарат вакуумного типу з вертикально встановленим диском.

Точне розміщення насіння на висівному диску гарантує точне розміщення насіння в борозні. Компанія Monosem використала всі свої доробки, щоб створити висівний апарат, який характеризувався б надійністю, простотою і точністю.

Завдяки унікальній конструкції, висівні диски, виготовлені з нержавіючої сталі, можна легко замінити без інструментів. Скидач зайвого насіння виготовлено з бронзи, а за рахунок пружини, яка його підтримує, повністю запобігає подвійному скиданню насіння.



Рисунок 12 – Загальний вигляд посівної секції сівалки NC Technic компанії Monosem
Джерело: [11]

Вона може бути виконана в трьох типах посівних секцій (ширина захвату від 3 до 9,2 м, ширина міжряддя – 45-50 см). Для контролю й керування процесом висіву Monosem використовує різноманітні електронних прилади серії CS.

Висновки. Як видно, за конструктивним виконанням пневмомеханічні апарати можуть бути дисковими або барабанными, а за способом використання повітря їх розрізняють на вакуумні та апарати надлишкового тиску.

Барабанні висівні апарати не знайшли широкого застосування внаслідок невирішеності ряду питань (сівалки Amazone EDX 9000-T). Основними з них є їх високе конструктивне розташування відносно дна борозни, що призводить до перерозподілу вихідних інтервалів між насінням при їх русі до борозни та значного збільшення їх варіації по довжині рядка. Крім того, внаслідок неефективного видалення зайвого насіння із комірок, для них характерна наявність великої кількості «двійників».

На даний час, найбільш розповсюдженими є дискові висівні апарати вакуумної дії, які в значній мірі усувають зазначені вище недоліки (сівалка 3P3025AH Great Plains, Prosem P компанії Quivogne, Planter 3 компанії Kuhn, Maestra компанії Maschio). Вони мають відносно малі габарити, що дозволяє розмістити їх безпосередньо над сошником без застосування насіннепроводів, які найбільш суттєво впливають на перерозподіл вихідних інтервалів між насінням. Крім того, вони мають більш ефективні пристрої для видалення зайвого насіння з присмоктувальних отворів висівного диска і, як правило, забезпечують більш рівномірний вихідний потік насіння.

Перевагами висівних апаратів з надлишковим тиском повітря порівняно з вакуумними є додаткові важливі функції повітряного потоку, які покращують роботу апарата, а саме: видалення зайвого насіння із комірок висівних елементів та пневмотранспортування насіння від висівного диска до дна борозни з певним перерозподілом рівномірності (сівалка Tempo T компанії Väderstad, Aeromat A компанії Becker, MF 555 компанії Massey Ferguson).

Недоліком, притаманним одночасно всім висівним апаратам надлишкового тиску є необхідність герметизації їх насінневих бункерів для зменшення втрат повітря і покращення подачі насіння з бункера в робочу камеру.

Потрібно відзначити, що у світі є досить велике коло виробників сівалок для точного висіву насіння просапних культур та посівних комплексів. Знаряддя відрізняються універсальністю, високою продуктивністю, надійністю й великою точністю виконання робіт. Широко впроваджуються засоби електронного керування й контролю над виконанням робочих операцій. Усі виробники продовжують активно вести роботи з удосконалювання конструкцій сівалок і підвищенню їх експлуатаційної надійності.

Україна також може запропонувати свої розробки, які мають не тільки досить прийнятну ціну, а свої «ізіюминки» – майже всі вітчизняні виробники виконують вдосконалення техніки, ремонт її та обслуговування, як закордонної до наших умов господарювання, так і вдосконалення вітчизняної.

Список літератури

1. Patent US of America №773205, dated October 25, 1904, Seed-planting machine, George William Green.
2. Breved d'invention de Republique Francaise №480.986, publie 19 octobre 1916, Outil de semaille, M. Charles Bristow.
3. Васильковська К. В. Обґрунтування параметрів універсального пневмомеханічного висівного апарата точного висіву: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / Кіровоград. нац. техн. ун-т. Кіровоград, 2014. 20 с.
4. Петренко М.М., Васильковський М.І., Васильковська К.В. Аналіз конструкцій висівних апаратів точного висіву. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського*

- господарства ім. П. Василенка, Т. 1 «Механізація сільськогосподарського виробництва». Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2010. Вип. 93. С. 157-163.
5. Каталог сівалок точного висіву AMAZONE (Німеччина). URL: <http://info.amazone.de>
 6. Каталог продукції компанії VÄDERSTAD (Швеція). URL: <http://vaderstad.com/ua/Products>
 7. Бойко А.И., Свирень Н.А. Повышение эффективности и надежности работы высевающих аппаратов посевных машин: Монография. Кіровоград: КОД, 2011. 276 с.
 8. Сучасні тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарської техніки / В.В. Адамчук та ін.; за ред. В.І. Кравчука, М.І. Грицишина, С.М. Ковалю. Київ: Аграрна наука, 2004. 396 с.
 9. Каталог продукції компанії KUHN (Франція). URL: <http://www.kuhn.ua/internet/webua.nsf/>.
 10. Каталог продукції GASPARD (Італія). URL: <http://www.maschionet.com/page-378/>
 11. Каталог продукції компанії MONOSEM (Франція). URL: Режим доступу: <http://www.monosem.fr/>

References

1. Patent US of America №773205, dated October 25, 1904, Seed-planting machine, George William Green [in English].
2. Brevet d'invention de Republique Francaise №480.986, publie 19 octobre 1916, Outil de semaille, M. Charles Bristow [in English].
3. Vasylykova, K.V. (2014). Obgruntuvannya parametriv universal'noho pnevmomekhanichnoho vysivnoho aparata tochnoho vysivu [Justification-purpose pneumatic precision seeder sowing device]. *Candidate's thesis*. Kirovohrad [in Ukrainian].
4. Petrenko, M.M., Vasylykova, K.V., Vasylykova, K.V. (2010). Analiz konstruktivnykh vyvnykh aparativ tochnoho vysivu [Analysis of constructions of sowing vehicles of seed-spacing]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva im. P. Vasylenka, T. 1 «Mekhanizatsiia sil's'kohospodars'koho vyrobnytstva»*, Vol. 93, 157-163 [in Ukrainian].
5. Katalog sivalok tochnoho vysivu AMAZONE (Nimechyna) [Catalog of precision sowing machines AMAZONE]. *amazone info-portal*. Retrieved from <http://info.amazone.de> [in Ukrainian].
6. Katalog produktii kompanii VÄDERSTAD (Shvetsiia) [Catalog of the company VÄDERSTAD]. *vaderstad.com*. Retrieved from <http://vaderstad.com/ua/Products> [in Ukrainian].
7. Bojko, A.I., Sviren', N.A. (2011). Povyshenie jeffektivnosti i nadezhnosti raboty vysevayushhih apparatov posevnykh mashin [Increase of the effectiveness and reliability of work vysevayushchyh apparatov posevnykh machines]. Kirovograd: KOD [in Ukrainian].
8. Adamchuk, V.V., Baranov, H.L., Baranovskiy, O.S. et al. (2004). *Modern trends structures agricultural machinery*. V.I. Kravchuk, M.I. Hrytsyshyna, S.M. Kovalia (Ed.). Kyiv: Ahrarna nauka [in Ukrainian].
9. Katalog produktii kompanii KUHN (Frantsiia) [Catalog of the company KUHN]. *kuhn.ua*. Retrieved from <http://www.kuhn.ua/internet/webua.nsf/> [in Ukrainian].
10. Katalog produktii GASPARD (Italiia) [GASPARD product catalog]. *maschionet.com*. Retrieved from <http://www.maschionet.com/page-378/> [in Ukrainian].
11. Katalog produktii kompanii MONOSEM (Frantsiia) [The product catalog of MONOSEM]. *monosem.ru*. Retrieved from <http://www.monosem.fr/> [in Ukrainian].

Kateryna Vasylykovska, PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

System Analysis of Constructions of Pneumomechanical Seeding Machines for Precise Seeding of Seed Crops

The purpose of precision sowing is to obtain evenly spaced field fields of plants, which in this case have the same feeding area and develop in the best way.

The analysis of the most common designs of seeding machines for precise seeding of cultivating crops has made it possible to establish that today the most common are pneumomechanical seeding machines, which, despite the greater complexity, are more versatile and less damaging the seeds to structural elements. Pneumomechanical seeding machines can be disc or drum - by design and vacuum or overpressure - by way of air supply.

Drum seeding machines have not been widely used due to unresolved issues (sowing machine Amazone EDX 9000-T). The main ones are their high constructional position relative to the bottom of the furrow, which leads to a redistribution of the initial intervals between the seeds when they move to the furrow and a significant increase in their variation along the length of the line. In addition, due to the ineffective removal of unnecessary seeds from cells, they are characterized by the presence of a large number of "twins".

Currently, the most common are disk driven vacuum devices, which largely eliminate the disadvantages mentioned above (sowing machine 3P3025AH Great Plains, Quivogne Prosem P, Kuhn Planter 3, Maestra Maschio). They have relatively small dimensions, which allows them to be placed directly above the coulter without the use of seed lines, which most significantly affect the redistribution of seed intervals. In addition, they have more efficient devices for removing unnecessary seeds from the sucking holes of the seed disc and, as a rule, provide a more even output seed flow.

Among the disadvantages inherent in the most widespread vacuum seeding machines, the researchers noted an increase in uneven seed seed when increasing the number of seeding speed of the seed disk.

The advantages of sowing machines with excessive air pressure compared with vacuum are the additional important air flow functions that improve the work of the machine, namely: removal of unnecessary seeds from the cells of seeding elements and pneumotransport of seeds from the seed disk to the bottom of the furrow with a certain redistribution of uniformity (sowing machine Tempo T of the company Väderstad, Aeromat A for Becker, Massey Ferguson for MF 555).

The disadvantage inherent in all seed presses at the same time is the need to seal their seed bins to reduce air losses and improve the supply of seeds from the bunker to the working chamber, especially the Massey Ferguson MF 555 sowing machine.

structural analysis, seed drills, precise hanging, pneumatic machine seeding, advantages, disadvantages

Одержано (Received) 29.08.2018

Прорецензовано (Reviewed) 5.12.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 681.513.5

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.35-44>

Oleksiy Lobok, Assos. Prof., Phd Phys. & Math. Sci., **Boris Goncharenko**, Prof., DSc.

National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

Larisa Vihrova, Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

e-mail: vihrovalg@ukr.net

Marina Sych, PhD tech. sci.

National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine, Kyiv, Ukraine

e-mail: sm.nuft@gmail.com

The Problem of Selection of the Optimal Strategy of Minimax Control by Objects in Agricultural Production with Distributed Parameters

The problem of minimax control synthesis for objects in agricultural production that are described by a two-dimensional heat conduction equation of parabolic type is solved. It is assumed that the control object functions under uncertainty conditions, and the perturbations acting on the object belong to some given hyperellipsoid. The problem of constructing a regulator in the state of an object for cases of point and mobile limit control is considered in accordance with the integral-quadratic quality criterion. With the help of numerical optimization methods, the problem of determining the optimal location of concentrated regulators at the boundary of a rectangular region and the problem of finding the optimal law of motion of a mobile limit regulator is solved. The problem is posed and solved in the minimax formulation when there is an optimal control on the state of the object functioning under uncertainty conditions so that the regulator minimizes the maximum control error from a set of possible values, taking into account the most unfavorable perturbations that

can act on the object or system. In this case, the perturbations of the object belong to a given limited region. The results of computational experiments illustrating the effectiveness of the constructed limiting concentrated and moving regulators are presented. The obtained results indicate that the controls found in the work are indeed optimal and ensure minimum errors (deviations from the given state) of the functioning of the system and energy costs for the implementation of control under given conditions and in the absence of any information on external action other than the region of permissible perturbations.

In the work, for the first time, a minimax approach was used to control the objects described by the two-dimensional parabolic type thermal conductivity equation; the theoretical positions of synthesis of minimax regulators for cases of lumped boundary (point) and moving regulators are considered; algorithmic software is developed that allows to simulate the dynamics of the constructed minimax-regulators and to investigate the corresponding transients.

minimax control, regulators, distributed parameter systems, optimization, gradient projection method, point and mobile limit controls

О.П. Лобок, доц., канд. физ.-мат. наук, **Б.М. Гончаренко**, проф., д-р техн. наук

Національний університет пищевых технологий, Киев, Украина

Л.Г. Вихрова, проф., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Украина

М.А. Сыч, канд. техн. наук

Національний університет биоресурсов і природоиспользования Украины, Киев, Украина

Задача выбора оптимальной стратегии минимаксного управления объектами в сельскохозяйственном производстве с распределенными параметрами

В работе решается задача синтеза минимаксного управления для объектов в сельскохозяйственном производстве, которые описываются двумерным уравнением теплопроводности параболического типа. Предполагается, что объект управления функционирует в условиях неопределенности, причем возмущения, действующие на объект, принадлежат некоторому заданному гиперэллипсоиду. Рассматривается задача построения регулятора по состоянию объекта для случаев точечного и подвижного предельного управления в соответствии с интегрально-квадратичным критерием качества. С помощью числовых оптимизационных методов решена задача определения оптимального расположения сосредоточенных регуляторов на границе прямоугольной области и задача поиска оптимального закона перемещения подвижного предельного регулятора. Задача ставится и решается в минимаксной постановке, когда находится оптимальное регулирование по состоянию объекта, функционирующего в условиях неопределенности так, что регулятор обеспечивает минимизацию максимальной погрешности регулирования из множества возможных значений с учетом наиболее неблагоприятных возмущений, которые могут действовать на объект или систему. При этом возмущения объекта относятся к заданной ограниченной области. Приводятся результаты вычислительных экспериментов, иллюстрирующие эффективность построенных предельных сосредоточенных и подвижных регуляторов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что найденные в работе управления действительно являются оптимальными и обеспечивают минимум погрешности (отклонения от заданного состояния) функционирования системы и энергетических затрат на осуществление управления при заданных условиях и при отсутствии какой-либо информации о внешнем воздействии, кроме области допустимых возмущений.

минимаксное управление, регуляторы, системы с распределенными параметрами, оптимизация, метод проекции градиента, точечное и подвижное предельные управления

Introduction. In connection with the widespread adoption of new advanced technologies related to the use of electronic, ion, laser and other radiation, in recent years intensive study of the possibilities of optimal control of distributed source systems by changing the location of point sources of radiation and the laws of motion of moving.

Statement of the problem and analysis of recent researches. The determination of the problems of point and motion control, some methods of their solution are given in the works [1,2,3]. One of the most important and complex tasks is the choice of an optimal point and move control strategy for systems that operate under uncertainty. It is this problem that is devoted to this article, which solves the problem of choosing the optimal location of point regulators and finding the optimal law of motion (moving) of a moving source at the boundary of a rectangular region for the process of heat transfer occurring under incomplete

information. The theory of control moves towards the complexity of the phenomena studied, processes and the reduction of information about the control system, the object, its features, properties, characteristics, operating conditions, external influences. Taking into account all the above-mentioned, the chosen direction of research is perspective and has a high level of relevance.

The purpose of the article is the practical application of the theory of synthesis of minimax regulators to the problems of controlling the choice of optimal arrangement of point regulators and the search for an optimal motion law in conditions of uncertainty of external perturbations acting on them in the domain of their admissibility.

Presenting main material. Let the process of heat transfer in a homogeneous thin rectangular plate be described by a function $\varphi(x, t)$, which is in the area $Q_T = \Omega \times (0, T)$, where $\Omega = \{(x_1, x_2): 0 < x_1 < l_1, 0 < x_2 < l_2\}$, $l_1, l_2 > 0$, $T < \infty$, satisfies the equation

$$\frac{\partial \varphi(x, t)}{\partial t} = a \Delta_x \varphi(x, t) + f_1(x, t), \quad (x, t) \in Q_T, \quad (1)$$

but on the border Q_T – additional conditions

$$\varphi(x, 0) = f_0(x), \quad x \in \Omega; \quad \varphi(x, t) = \sum_{i=1}^N \delta(x - v_i(t)) u_i(t), \quad (x, t) \in \Gamma \times (0, T). \quad (2)$$

Here $\Delta_x = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}$ – two-dimensional Laplace operator;

$a > 0$ – coefficient of temperature conductivity;

Γ – border of rectangular area Ω ;

$\delta(x - y)$ – Dirac's delta function;

$t \rightarrow v_i(t) \in \Gamma$ – dimensional functions that determine the motion of boundary sources;

$u_i(t) \in L_2(0, T)$ – control functions;

$f_0(x) \in L_2(\Omega)$, $f_1(x, t) \in L_2(Q_T)$ – unknown functions belonging to the area

$$S_t = \{(f_0, f_1): G(f_0; f_1(\tau), 0 < \tau < t) \leq 1\}, \quad t \in (0, T], \quad (3)$$

where

$$G(f_0; f_1(\tau), 0 < \tau < t) = F_0 \int_{\Omega} f_0^2(x) dx + F_1 \int_0^t \int_{\Omega} f_1^2(x, \tau) dx d\tau,$$

and F_0, F_1 – positive constant values reflecting the contribution of noise f_0 and $f_1(t)$ in the final perturbation, acting on the system (1), (2).

Under the solution of the boundary value problem (1), (2) we will understand such a function $\varphi(x, t) \in L_2(Q_T)$, which satisfies the following integral identity

$$\begin{aligned} - \int_0^T \int_{\Omega} \varphi(x, t) \left(\frac{\partial \eta(x, t)}{\partial t} + a \Delta_x \eta(x, t) \right) dx dt &= \int_{\Omega} f_0(x) \eta(x, 0) dx + \int_0^T \int_{\Omega} f_1(x, t) \eta(x, t) dx dt - \\ &- a \sum_{i=1}^N \int_0^T u_i(t) \frac{\partial \eta(x, t)}{\partial n} \Big|_{x=v_i(t)} dt \quad \forall \eta(x, t) \in \Phi, \end{aligned} \quad (4)$$

where $\frac{\partial}{\partial n}$ – derivative of the external normal $\vec{n}$ to the border Γ of the area Ω ,

$$\Phi = \left\{ \eta(x, t) : \eta(x, t) \in H^{3,1}(Q_T), \eta(x, T) = 0, x \in \Omega; \eta(x, t) = 0, (x, t) \in \Gamma \times (0, T) \right\},$$

$H^{3,1}(Q_T)$ – Sobolovsky space [4].

It can be shown [5] that the solution of equation (4) with given controls $u_i(t) \in L_2(0, T)$ exists and is unique in space $L_2(Q_T)$. The task of choosing the optimal strategy for minimax control [6, 8] will be to find vector functions $v^*(t) = [v_1^*(t), v_2^*(t), \dots, v_N^*(t)]^T$ and $u^*(t) = [u_1^*(t), u_2^*(t), \dots, u_N^*(t)]^T$ under conditions

$$I(u^*, v^*) = \inf_v \inf_u I(u, v), \quad (5)$$

where

$$I(u, v) = \sup_{S_T} \left[\int_{\Omega} S(x) \varphi(x, T) dx \right]^2 + \int_0^T \sum_{i=1}^N d_i \sup_{S_i} u_i^2(t) dt, \quad (6)$$

$S(x) \in L_2(\Omega)$, $d_i = \text{const} > 0$, $i = 1, 2, \dots, N$, with a given control structure $u_i(t)$ in the form of a linear feedback

$$u_i(t) = \int_{\Omega} R_i(x, t) \varphi(x, t) dx. \quad (7)$$

The solution of the formulated problem will be carried out in two stages: first we solve the problem of determining the optimal control $u^*(t)$ under condition

$$I(u^*, v) = \inf_u I(u, v) \quad (8)$$

for a fixed vector-function $v(t)$, and then find it $v^*(t)$, at which

$$I(u^*, v^*) = \inf_v I(u^*, v). \quad (9)$$

According to the results of [7,8], the following theorem is proved: optimal control $u^*(t)$ of the optimization problem (1), (2), (6), (7) satisfying the necessary optimality conditions has the form

$$u_i^*(t) = \int_{\Omega} R_i^*(x, t) \varphi(x, t) dx, \quad R_i^*(x, t) = a d_i^{-1} \alpha^{-1}(t) g(x, t) h(v_i(t), t), \quad (10)$$

where

$$\alpha(t) = 1 + a^2 \sum_{k=1}^N d_k^{-1} \int_t^T h^2(v_k(\tau), \tau) d\tau, \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} g(x, t) \\ h(x, t) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{\infty} s_i e^{\lambda_i(t-T)} \begin{bmatrix} \omega_i(x) \\ r_i(x) \end{bmatrix}, \quad s_i = \int_{\Omega} S(x) \omega_i(x) dx.$$

In the ratio (11) $i = (i_1, i_2)$ – multiindex

$$r_i(x) = r_{i_1, i_2}(x_1, x_2) = \frac{2\pi}{\sqrt{l_1 l_2}} \begin{cases} (-1)^{i_1} \frac{i_1}{l_1} \sin \frac{\pi i_2 x_2}{l_2}, & x_1 = l_1, \\ -\frac{i_1}{l_1} \sin \frac{\pi i_2 x_2}{l_2}, & x_1 = 0, \\ (-1)^{i_2} \frac{i_2}{l_2} \sin \frac{\pi i_1 x_1}{l_1}, & x_2 = l_2, \\ -\frac{i_2}{l_2} \sin \frac{\pi i_1 x_1}{l_1}, & x_2 = 0, \end{cases} \quad x = (x_1, x_2) \in \Gamma,$$

where λ_i , $\omega_i(x)$ – eigenvalues and corresponding orthonormalities in space $L_2(\Omega)$ own functions of the boundary value problem (1), (2) having the form

$$\lambda_i = \lambda_{i_1, i_2} = a\pi^2 \left[(i_1/l_1)^2 + (i_2/l_2)^2 \right],$$

$$\omega_i(x) = \omega_{i_1, i_2}(x_1, x_2) = \frac{2}{\sqrt{l_1 l_2}} \sin \frac{\pi i_1 x_1}{l_1} \sin \frac{\pi i_2 x_2}{l_2}.$$

The value of the functional (6) for optimal control (10) is determined by the formula

$$I(u^*, v) = \frac{W(0)}{F_0 \alpha(0)} + \frac{1}{F_1} \int_0^T \frac{W(t)}{\alpha(t)} dt, \quad (12)$$

where

$$W(t) = \sum_{i=1}^{\infty} s_i e^{2\lambda_i(t-T)}. \quad (13)$$

Let us now turn to the solution of the optimization problem (9), (12). Let's consider first a simpler case when $v_i(t) \equiv z_i \in \Gamma$, $i = 1, 2, \dots, N$, that is, we solve the problem of optimal location of point boundary controls (10). Let's introduce the designation $z = [z_1, z_2, \dots, z_N]^T$, $J(z) = I(u^*, z) \equiv I(u^*, v)$. Then the task under consideration will be to find the vector $z = [z_1^*, z_2^*, \dots, z_N^*]^T$, at which

$$J(z^*) = \inf_{z \in \Omega_z} J(z) \quad (14)$$

where $\Omega_z = \{z : z = [z_1, z_2, \dots, z_N]^T, z_i = (z_{1i}, z_{2i}) \in \Gamma, i = 1, 2, \dots, N; z_i \neq z_j, i \neq j\}$.

Given that function $J(z)$ is a continuously differentiated function of its arguments, to solve the optimization problem (14) we use the gradient projection method [9]

$$z^{k+1} = \text{Pr}_{\Omega_z} [z^k - \rho_k \nabla_z J(z^k)], \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (15)$$

where $\text{Pr}_{\Omega_z} [z] = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$, $y_i = \text{Pr}_{\Gamma} [z_i]$ – projection of point z_i on the border Γ of a rectangular area Ω ;

$z^k = [z_1^k, z_2^k, \dots, z_N^k]^T$ – approximate solution obtained on k -th iteration;

z^0 – initial approximation;

ρ_k – step of descent, which is chosen from the condition of the monotonous decline of the function of purpose $J(z)$ [9]; gradient $\nabla_z J(z)$ is determined by the formula

$$\begin{aligned}\nabla_z J(z) &= [\nabla_{z_1} J(z), \nabla_{z_2} J(z), \dots, \nabla_{z_N} J(z)]^T, \\ z &= [z_1, z_2, \dots, z_N]^T, \quad z_i = (z_{1i}, z_{2i}) \in \Gamma, \quad i = 1, 2, \dots, N, \\ \nabla_{z_n} J(z) &= -2a^2 \left[\frac{W(0)\theta_n(0)}{F_0\alpha^2(0)} + \frac{1}{F_1} \int_0^T \frac{W(t)\theta_n(t)}{\alpha^2(t)} dt \right], \\ \theta_n(t) &= d_n^{-1} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1 - e^{(\lambda_i + \lambda_j)(t-T)}}{\lambda_i + \lambda_j} s_i s_j r_i(z_n) P_j(z_n),\end{aligned}$$

where $P_j(z_n) = [P_j^1(z_n), P_j^2(z_n)]$,

$$P_j^k(z_n) = P_{j_1, j_2}^k(z_{1n}, z_{2n}) = \frac{2\pi^2 j_1 j_2}{(l_1 l_2)^{3/2}} \cos \frac{\pi j_k z_{kn}}{l_k} \begin{cases} 0, & z_{kn} = 0, \quad z_{kn} = l_k, \\ -1, & z_{3-k, n} = 0, \\ (-1)^{j_{3-k}}, & z_{3-k, n} = l_{3-k}, \end{cases} \quad k = 1, 2.$$

The condition of the stop was taken in the form $|J(z^{k+1}) - J(z^k)| < \varepsilon$, where $\varepsilon > 0$ – the accuracy of the solution is given.

This algorithm was programmed in the algorithmic language Fortran 90 with the following initial data: $l_1 = 2.0$, $l_2 = 1.0$, $T = 2.0$, $F_0 = 0.25$, $F_1 = 2.0$, $d_i = 1.0$, $i = 1, 2, \dots, N$, $S(x) = 1.0$, $\varepsilon = 0.001$, $\rho_0 = 0.8$, number of regulators $N = 5$, for the value of the coefficient of thermal conductivity $a = 0.4$ was taken, which corresponds to the coefficient of thermal conductivity of the copper plate. The dimension of all quantities is given in the system [meter, time, deg. C°, kcal.]. The infinite series (11), (13) were broken off by the finite sum of the three first members. For numerical simulation of optimal controls $u_i^*(t)$ it was assumed that perturbation $f_0(x)$ and $f_1(x, t)$ is equal

$$f_0(x_1, x_2) = 2 \sin \frac{\pi x_1}{l_1} \sin \frac{\pi x_2}{l_2}, \quad f_1(x_1, x_2, t) = t \sin \frac{\pi x_1}{l_1} \cos \frac{\pi x_2}{l_2}.$$

We note that these perturbations are permissible, because $G(f_0, f_1(\tau), 0 < \tau < t) = F_0 l_1 l_2 + \frac{1}{12} F_1 l_1 l_2 t^3 = 0.5 + \frac{1}{3} t^3 < 1$, $\forall t \in (0, 0.2)$ and as a result, $f_0(x)$ and $f_1(x, t)$ belong to the area (3).

Table 1 gives the initial location $z^0 = [z_1^0, z_2^0, \dots, z_N^0]^T$ point boundary regulators. Function value $J(z)$ at such an arrangement of controls equals $J(z^0) = 0.975632$. Optimal arrangement of regulators $z^* = [z_1^*, z_2^*, \dots, z_N^*]^T$, obtained by the algorithm (15), is given in the table 2 and $J(z^*) = 0.571874$.

Table 1.

k	z_{1k}^0	z_{2k}^0
1	2.0	0.0
2	1.0	0.0
3	0.0	0.0
4	0.0	0.5
5	0.0	1.0

Table 2.

k	z_{1k}^*	z_{2k}^*
1	1.349	0.0
2	1.0	0.0
3	0.651	0.0
4	0.0	0.5
5	0.651	1.0

Figure 1 shows graphs of optimal point controls (10) that are optimally located on the boundary Γ of the area Ω в точках $z_i^* \in \Gamma$, $i = 1, 2, \dots, N$.

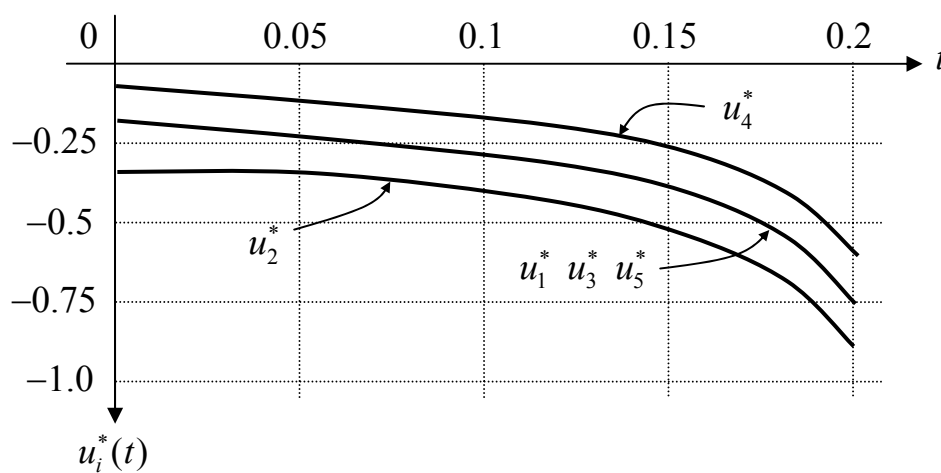


Figure 1 – Schedule of optimal boundary point controls

We now turn to the optimization problem (9), (12). Let's look for simplicity one ($N = 1$) a moving source and let the perturbation $f_1(x, t)$ in the right side of equation (1) will be absent. Let's denote $u(t) = u_1(t)$, $v(t) = v_1(t)$, $d = d_1$, $J(v) = I(u^*, v)$. Then the task of minimizing the functional

$$J(v) = W(0)(F_0\alpha(0))^{-1} \quad (16)$$

is equivalent to the next optimization problem

$$L(v) = \int_0^T h(v(\tau), \tau) d\tau \rightarrow \sup_{\substack{t \rightarrow v(t) \in \Gamma \\ t \in (0, T)}},$$

where $\alpha(t)$, $h(x, t)$, $W(t)$ – functions determined by the formulas (11), (13).

To solve the last problem, the projection method of the gradient of the species was also used

$$v^{k+1}(t) = \text{Pr}_\Gamma \left[v^k(t) + \rho_k \delta[L(v^k); t] \right], \quad t \in (0, T), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (17)$$

where $v^0(t)$ – initial approximation;

$v^k(t)$ – Approximate solution obtained at k-th step;

ρ_k – step of descent to the minimum point;

$\delta[L(v); t]$ – graceful Frechet functional $L(v)$ which is calculated by the formula

$$\delta[L(v);t] = 2h(v(t),t)\rho(v(t),t), \quad \rho(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} s_i e^{\lambda_i(t-T)} P_i(x).$$

The algorithm stops when is fulfilled the condition $|L(v^{k+1}) - L(v^k)| < \varepsilon$, where $\varepsilon > 0$ – the accuracy of the solution is given.

Numerical implementation of the algorithm (17) was carried out with the above earlier data. Below are the results of computational calculations. In table 3 the initial law of motion is given $v^0(t) = (v_1^0(t), v_2^0(t))$ for a moving boundary source. Optimal motion law $v^*(t) = (v_1^*(t), v_2^*(t))$ of the moving controller (10), obtained by the algorithm (17), is given in table 4.

Table 3.

t	$v_1^0(t)$	$v_2^0(t)$
0.0	0.0	0.0
0.02	0.667	0.0
0.04	1.333	0.0
0.06	2.0	0.0
0.08	2.0	0.5
0.10	2.0	1.0
0.12	1.333	1.0
0.14	0.667	1.0
0.16	0.0	1.0
0.18	0.0	0.5

Table 4.

t	$v_1^*(t)$	$v_2^*(t)$
0.0	0.010	0.0
0.02	0.765	0.0
0.04	1.230	0.0
0.06	1.990	0.0
0.08	2.0	0.5
0.10	1.990	1.0
0.12	1.285	1.0
0.14	0.664	1.0
0.16	0.010	1.0
0.18	0.0	0.5

The value of the functional (16) thus decreased from $J(z^0) = 0.639538$ to $J(z^*) = 0.438419$. In fig. 2 shows an optimal control (10), the movement of which is carried out in the optimal trajectory, shown in the table 4. The optimal trajectory consists of four parts, each of which resembles a parabola and defines (describes) the motion of the regulator along the corresponding boundary of the rectangular area.

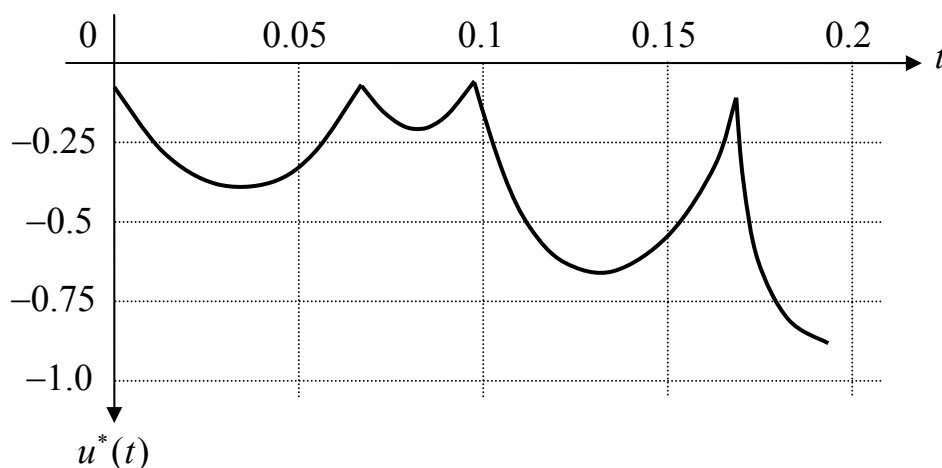


Figure 2 – Schedule of Optimum Limit Moving Control

The computational experiments also showed that the efficiency of point and moving boundary controls increases with a decrease in the coefficient of temperature conductivity, that is, with the decrease of this coefficient the value of the functional (8) after determining the optimal control strategy decreased by a larger value compared with the value of the same functional with a given initial control strategy.

Conclusions. In this paper the solution of the problem of finding the optimal placement strategy for point boundary regulators and the problem of determining the optimal trajectory of moving a regulator along the boundary of the region in which the distributed control object functions is achieved. The problem is solved and solved in a minimal-scale setting, that is, an optimal controller is found for the state of the object, which functions in conditions of uncertainty, and the perturbation of the object belongs to a given bounded domain. The results of computational experiments are presented, which illustrate the efficiency of constructed lumped boundary point and moving regulators. The obtained results indicate that the control outputs are actually optimal and provide a minimum of errors (deviations from the given state) of the system's operation and energy costs for the control of the given conditions and the absence of any information on external influences, in addition to the area of permissible perturbations. Satisfactory performance indicators are observed even in the event of disturbance beyond the boundaries of a given area.

References

1. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. Москва: Наука, 1975. 568.
2. Бутковский А.Г., Даринский Ю.В., Пустыльников Л.М. Подвижное управление системами с распределенными параметрами. *Автоматика и телемеханика*, 1976. №2. С. 15-25
3. Бутковский А.Г., Пустыльников Л.М. Теория подвижного управления системами с распределенными параметрами. Москва: Наука. 1980. 397 с.
4. Лионс Ж.-Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными. Москва: Мир, 1972. 414 с.
5. Ладыженская О.А., Уралцева Н.Н., Солонников В.А. Линейные и квазилинейные уравнения параболического типа. Москва: Наука, 1967. 736 с.
6. Лобок О.П., Гончаренко Б.М., Савіцька Н.М. Мінімаксне управління в лінійних динамічних системах із розподіленими параметрами. *Журнал «Наукові праці НУХТ»*. Київ: НУХТ, 2015. Т. 21, № 6. С.16 – 26.
7. Кириченко Н.Ф. Минимаксное управление и оценивание в динамических системах. *Автоматика и телемеханика*, 1982. №1. С. 32-39
8. Лобок А.П. Минимаксные регуляторы в системах с распределенными параметрами. *Вестн. Киев. универ. Моделирование и оптимизация сложных систем*, 1983. Вып.2. С. 62-67.
9. Васильев Ф.П. Методы решения экстремальных задач. Москва: Наука, 1981. 400 с.

References

1. Butkovskij, A.G. (1975). Metodi upravlenija sistemami s raspredeleennymi parametrami [Control Systems for Distributed Parameters]. Moscow: Nauka [in Russian].
2. Butkovskij, A.G., Darinskij, Ju.V., Pustyl'nikov, L.M. (1976). Podvizhnoe upravlenie sistemami s raspredeleennymi parametrami [Movable control systems with distributed parameters]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2, 15-25 [in Russian].
3. Butkovskij, A.G., Pustyl'nikov, L.M. (1980). Teorija podvizhnogo upravlenija sistemami s raspredeleennymi parametrami [Theory of mobile control systems with distributed parameters]. Moscow: Nauka [in Russian].
4. Lions Zh.-L. (1972). Optimal'noe upravlenie sistemami, opisывajushhimisja uravnenijami s chastnymi proizvodnymi [Optimal control of systems described by partial differential equations]. Moscow: Mir [in Russian].
5. Ladyzhenskaja, O.A., Ural'ceva, N.N., Solonnikov, V.A. (1967). Linejnye i kvazilinejnye uravnenija parabolicheskogo tipa [Linear and quasilinear parabolic equations]. Moscow: Nauka [in Russian].

6. Lobok, O.P., Honcharenko, B.M., Savits'ka, N.M. (2015). Minimaksne upravlinnia v liniynykh dynamicnykh systemakh iz rozpodilenyi parametry [Minimax control in linear dynamic systems with distributed parameters]. *Zhurnal «Naukovi pratsi NUKhT»*, Vol. 21, 6, 16–26. [in Ukrainian].
7. Kirichenko, N.F. (1982). Minimaksnoe upravlenie i ocenivanie v dinamicheskikh sistemakh [Minimax control and estimation in dynamic systems]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1, 32-39 [in Russian].
8. Lobok, A.P. (1983). Minimaksnye regulatory v sistemakh s raspredelennymi parametrami [Minimax control and estimation in dynamic systems]. *Modelirovanie i optimizaciya slozhnykh sistem.*, Vol.2, 62-67 [in Russian].
9. Vasil'ev, F.P. (1981). Metody resheniya jekstremal'nykh zadach [Methods for solving extremal problems]. Moscow: Nauka [in Russian].

О.П. Лобок, доц., канд. фіз.-мат. наук, **Б.М. Гончаренко**, проф., д-р техн. наук

Національний університет харчових технологій, Київ, Україна

Л.Г. Віхрова, проф., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

М.А. Сич, канд. техн. наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м.Київ, Україна

Задача вибору оптимальної стратегії мінімаксного керування в

сільськогосподарському виробництві об'єктами з розподіленими параметрами

В роботі розв'язується задача синтезу мінімаксного керування для об'єктів сільськогосподарського виробництва, які описуються двовимірним рівнянням теплопровідності параболічного типу. Передбачається, що об'єкт керування функціонує в умовах невизначеності, причому збурення, що діють на об'єкт, належать деякому заданому гіпереліпсоїду. Розглядається задача побудови регулятора стану об'єкта для випадків точкового і рухомого граничного керування згідно з інтегрально-квадратичним критерієм якості. За допомогою числових оптимізаційних методів розв'язана задача визначення оптимального розташування зосереджених регуляторів на кордоні прямокутної області і завдання пошуку оптимального закону переміщення рухомого граничного регулятора. Задача ставиться і розв'язується в мінімаксовій постановці, коли знаходиться оптимальне регулювання станом об'єкта, який функціонує в умовах невизначеності так, що регулятор забезпечує мінімізацію максимальної похибки регулювання з безлічі можливих значень з урахуванням найбільш несприятливих збурень, які можуть діяти на об'єкт або систему. При цьому збурення об'єкта стосується до заданої обмеженої області. Наводяться результати обчислювальних експериментів, що ілюструють ефективність побудованих граничних зосереджених і рухомих регуляторів.

Отримані результати свідчать про те, що знайдені в роботі керування дійсно є оптимальними і забезпечують мінімум похибки (відхилення від заданого стану) функціонування системи і енергетичних витрат на здійснення керування при заданих умовах і при відсутності будь-якої інформації про зовнішні впливи, крім області допустимих збурень.

мінімаксне керування, регулятори, системи з розподіленими параметрами, оптимізація, метод проекції градієнта, точкове і рухоме граничне керування

Одержано (Received) 06.10.2018

Прорецензовано (Reviewed) 22.11.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 621.432

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.45-53>

А.В. Рудковський, канд. техн. наук, ст. наук. співр.

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, Україна

e-mail: coating@ipp.kiev.ua

С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук, **С.С. Михайлюта**, асп.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: marko60@ukr.net; e-mail: sergejmihajluta2@gmail.com

Методика планування експерименту та побудови математичної моделі процесу зміцнення поршнів автотракторних двигунів вакуумним азотуванням у пульсуючому пучку плазми

В роботі розроблена методика планування експерименту та побудови математичної моделі за допомогою обчислювального експерименту, що дозволить провести пошук оптимальних технологічних режимів формування дифузійних шарів вакуумним азотуванням у пульсуючому пучку плазми, які забезпечать підвищення опору ізотермічній та термоциклічній повзучості поршнів.

Вирішення задачі проводилось за наступними етапами: формалізація задачі, конструювання плану експерименту, проведення експерименту, попередній статистичний аналіз результатів експерименту, побудова математичних моделей за результатами експерименту, аналіз якості отриманої моделі, проведення розрахункового експерименту, формування висновків та рекомендацій.

На останньому етапі проводиться узагальнення досліджень, формуються висновки та рекомендації щодо впровадження технологічного процесу.

вакуумне азотування, математична модель, вакуумне азотування, критерій

А.В. Рудковский, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, г. Киев, Украина

С.И. Маркович, доц., канд. техн. наук, **С.С. Михайлюта**, асп.

Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Украина

Методика планирования эксперимента и построения математической модели процесса укрепления поршней автотракторных двигателей вакуумным азотированием в пульсирующем пучке плазмы

В работе разработана методика планирования эксперимента и построения математической модели с помощью вычислительного эксперимента, который позволит провести поиск оптимальных технологических режимов формирования диффузионных слоев вакуумным азотированием в пульсирующем пучке плазмы, которые обеспечат повышение сопротивления изотермической и термоциклической ползучести поршней.

Решение задачи проводилось за следующими этапами: формализация задачи, конструирования плана эксперимента, проведения эксперимента, предыдущий статистический анализ результатов эксперимента, построение математических моделей за результатами эксперимента, анализ качества полученной модели, проведения расчетного эксперимента, формирования выводов и рекомендаций.

На последнем этапе проводится обобщение исследований, формулируются выводы и рекомендации относительно внедрения технологического процесса.

вакуумное азотирование, математическая модель, вакуумное азотирование, критерий

Постановка проблеми. Для ефективного аналізу механізму явищ та управління технологічним процесом зміцнення поршнів, що виготовлені із алюмінієвих сплавів необхідно виявити взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу, і представити їх у кількісній формі - в вигляді математичної моделі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Планування експерименту відноситься до статистичного методу ідентифікації складних систем [1,2]. Вирішення задачі щодо побудови математичної моделі технологічного процесу вакуумного азотування у пульсуючому пучку плазми проводилось за наступними етапами [3]: формалізація задачі, конструювання плану експерименту, проведення експерименту, попередній статистичний аналіз результатів експерименту, побудова математичних моделей за результатами експерименту, аналіз якості отриманої моделі, проведення розрахункового експерименту, формування висновків та рекомендацій.

При виконанні робіт досягається компроміс між метою та виділеними ресурсами. Результатом роботи є остаточний вибір рівнів варіювання незалежних змінних і видача завдання на генерацію плану у виді виразу [4]:

$$2^{k_1} \times 3^{k_2} \times 4^{k_3} / N, \quad (1)$$

де k_1, k_2, k_3 – число змінних, що варіюються відповідно на рівнях 2, 3... і т.д.;
 N – число дослідів.

Після проведення формалізації виконується конструювання плану експерименту. Питаннями конструювання експерименту займається теорія планування експерименту [5,6].

Постановка завдання. Розробити методику планування експерименту та побудови математичної моделі за допомогою обчислювального експерименту, що дозволить провести пошук оптимальних технологічних режимів формування дифузійних шарів вакуумним азотуванням у пульсуючому пучку плазми, які забезпечать підвищення опору ізотермічній та термоциклічній повзучості поршнів 260-1004021-СБ, що виготовлені із алюмінієвих сплавів, автотракторного двигуна Д-260.

Виклад основного матеріалу. У даній роботі пропонується використовувати план експерименту, що згенерований на основі ЛПІт – чисел, через те, що такі плани мають ряд переваг [2,4]:

- ці плани одночасно є і планами пошуку оптимальних умов і дозволяють більш глибоко аналізувати область, що досліджується;
- плани можуть бути використані як послідовні, тобто затрати можуть збільшуватися поступово і попередні результати поєднуються з наступними;
- при “випаданні” одного з експериментів властивості плану погіршуються в межах, що дозволяють його використовувати.

Вихідними даними для генерації матриці плану (матриці пробних точок) є:

N – максимальна кількість пробних дослідів, яка може бути проведена на даному кроці оптимізації;

M – кількість факторів (незалежних змінних), що впливають на критерії якості;

$NFI[M]$ – масив числа рівнів варіювання за кожним фактором;

$FN[K, M]$ – таблиця опису кодованих значень рівнів факторів.

Виходом має бути матриця пробних точок $X \setminus Y$, кожен рядок якої є умовами одного пробного дослідів.

Матриця XW будується за наступним алгоритмом.

Крок 1. Побудова матриці пробних точок з N дослідів для M змінних, що змінюються кожна безперервно на відрізьку $[0, 1]$.

Розрахунок значень здійснювали за наступною формулою [7]:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^m 2^{-k+1} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{l=k}^m [2\{i2^{-l}\}] \cdot [2\{r_j^{(l)} \cdot 2^{k-1-l}\}] \right\}, \quad (2)$$

де $m = 1 + \left\lceil \frac{\ln i}{\ln 2} \right\rceil$;

$[\cdot]$ – добуток цілої частини числа;

$\{\cdot\}$ – добуток дробової частини числа;

$r_j^{(l)}$ – значення з таблиці опорних чисел;

i – номер дослідів;

j – номер змінної.

Крок 2. Переведення одержаної матриці XW з кодованих змінних до натуральних. Після переведення всіх точок робота алгоритму завершується.

Конструювання плану експерименту в роботі проводилося за допомогою ППП ПРИАМ (пакет прикладних програм “Планування, регресія й аналіз моделей»). Отриманий план представляє собою матрицю, кожний рядок якої містить кодовані значення незалежних змінних для кожного рівня. Для планів на базі ЛПт кодовані значення рівнів представляють собою десятковий дріб в інтервалі від 0 до 1. Для цих планів перехід від кодованих значень до натуральних здійснюється за формулою:

$$X_{ij} = X_{\min j} + Q_{ij} \times (X_{\max j} - X_{\min j}), \quad (3)$$

де X_{ij} – натуральне значення j -го фактору в i -му досліді;

Q_{ij} – кодоване значення j -го фактору для i -го дослідів;

$X_{\max j}$ – максимальне значення j -го фактору;

$X_{\min j}$ – мінімальне значення j -го фактору.

Після проведення експерименту проводили попередній статистичний аналіз або попередню обробку результатів, що дозволить оцінити рівень “шуму” та відкинути грубі помилки. На цьому етапі розраховується середнє значення відгуку та дисперсії за кожним дослідом. Після цього, використовуючи критерій Кохрена, перевіряємо однорідність дисперсій та розраховуємо дисперсію відтворюваності. Розрахунок значення критерію Кохрена проводиться за формулою:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (4)$$

де $S_{\max}^2$ – максимальна з дисперсій;

S_i^2 – дисперсії, що розраховані в кожному експерименті за повторним (дублюючим) дослідом по формулі:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{n-1}, \quad (5)$$

де n – кількість дубльованих дослідів;

$\bar{Y}_i$ – середнє значення відгуку в i -му досліді;

Y_{ij} – значення відгуку в i -му досліді при j -му повторенні.

Результат порівнюється з табличним, і якщо $G_{роз} < G_{табл, n-1, N}$, то гіпотеза про однорідність приймається і дисперсія відтворюваності розраховується за формулою:

$$S_{відтвор.}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{(n-1)N}, \quad (6)$$

де N – кількість дослідів;

n – кількість дослідів, що дублюють, в i -ій строчці матриці планування;

$\bar{Y}_i$ – середнє значення функції відгуку з n дослідів.

Якщо дисперсія дослідів неоднорідна, то експеримент необхідно повторити для отримання нормального результату.

Побудова математичної моделі за результатами експерименту проходили у два етапи: вибір структури рівняння регресії та отримання значень коефіцієнтів регресії і їх статистичних характеристик. Отримання моделі і її характеристик в ПППІ ПРИАМ представляє собою двоетапну процедуру. На першому етапі з початкової безлічі регресорів, що включають всі головні ефекти і всі взаємодії заданих типів, вибирається деяка кількість, яка повинна включати пошукову структуру моделі. На другому етапі за допомогою процедури покрокового регресивного аналізу визначається кінцева структура моделі. Розрахунок коефіцієнтів математичної моделі проводили за формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{Y}_u}{n},$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{Y}_u \bar{X}_{iu}}{n}, \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{X}_{iu} \bar{X}_{ju} \bar{Y}_u}{n}. \quad (7)$$

Перевірка значущості коефіцієнтів рівняння регресії виконується за допомогою критерію Ст'юдента, розрахункове значення якого дорівнює:

$$t_{роз.} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}, \quad (8)$$

де b_i – значення i -го коефіцієнта регресії;

S_{b_i} – дисперсія коефіцієнтів регресії,

$$S_{b_i} = \frac{1}{N \cdot n} S^2. \quad (9)$$

Коефіцієнт вважається значущим, якщо $t_{роз.} \geq t_{табл.}$. Табличне значення критерію вибирається при кількості степенів свободи $nuf = N \cdot (n-1)$ та рівня значущості α . При $t_{роз.} < t_{табл.}$ гіпотеза щодо незначущості відповідного коефіцієнту приймається, тобто значення цього коефіцієнту знаходиться на рівні похибки експерименту, його можна прирівняти нулю і не включати в рівняння регресії.

Аналіз якості отриманої моделі проводиться з метою визначення придатності її для використання. Обов'язково необхідно перевірити такі властивості як інформативність, адекватність та стійкість моделі.

Найбільш часто оцінкою інформативності є величини множинного коефіцієнта кореляції R (коефіцієнт кореляції між експериментальним значенням відгуку й значенням відгуку, що розрахований за моделлю). Чим ближче він до одиниці, тим інформаційність моделі вища. Величина R^2 представляє собою

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2}, \quad (10)$$

де $\hat{Y}_i$ – значення функції відгуку, що розраховане для i -го досліджу за моделлю.

Емпірично встановлено, що для активного експерименту величина R повинна бути не менше 0,96...0,97. Але це не є необхідною і достатньою умовою. Достатньою умовою є перевірка значимості коефіцієнту множинної кореляції за критерієм Фішера.

$$F_R = \frac{S_R^2}{S_{\text{зал.}}^2} > F_{\alpha, V_R, V_{\text{зал.}}}, \quad (11)$$

де $V_R, V_{\text{зал.}}$ – представляють собою ступіні свободи для дисперсії, що пояснюється моделлю і залишковою дисперсією відповідно:

$$S_R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{(k-1)}, \quad S_{\text{зал.}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2}{(N-k)}, \quad (12)$$

де k – кількість членів моделі.

Якщо розрахункове значення більше табличного із заданим рівнем значимості, то модель інформативна. Для того щоб оцінити рівень інформативності кількісно, можна використати критерій Бокса-Веца. Хороша модель повинна мати параметр γ критерію не нижче, ніж 2...3. γ визначається з наступного рівняння:

$$F_0 \cong (1 + \gamma) F_{\alpha, V_0, V_{\text{зал.}}}, \quad (13)$$

$$\text{де } V_0 = \frac{V_R (1 + \gamma)^2}{1 + 2\gamma^2}.$$

Перевірка адекватності одержаної моделі зводиться до перевірки за критерієм Фішера. Розрахункове значення критерію визначається за формулою:

$$F_{\text{роз.}} = \frac{S_{\text{ад.}}^2}{S^2}, \quad (14)$$

де $S_{\text{ад.}}^2$ – дисперсія адекватності,

$$S_{\text{ад.}}^2 = \frac{n}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - Y_i)^2, \quad (15)$$

де l – кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії.

Табличне значення критерію адекватності вибирається при степені свободи чисельника $f_1 = N - 1$, знаменника $f_2 = N(n - 1)$ та рівня значимості α ($\alpha = 0,05$).

Якщо $F_{\text{роз}} \leq F_{\text{табл}}$, то можна з вибраною довірчою ймовірністю вважати, що модель адекватно описує процес, що досліджується. У протилежному випадку – модель неадекватна й потрібні неформальні дії для одержання адекватної моделі. Для цього можна перейти від лінійної моделі до моделі, в якій враховується не лінійність у вигляді добутку факторів

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j, \quad (16)$$

а потім до моделі другого порядку

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i^2. \quad (17)$$

Якщо і цього не досить, то можна змінити шкалу вихідної величини Y , або збільшити степінь поліному за допомогою ортогональних поліномів Чебишева та за допомогою плану третього порядку. Можна також провести новий експеримент, змінивши діапазони варіювання факторів, тобто область допустимих значень вхідних параметрів $x_i, i=1, 2, \dots, k$.

При аналізі стійкості розглядається таблиця мультиколінеарності та число обумовленості. Вона складається з: імен регресорів, що входять у модель; максимальний за абсолютною величиною коефіцієнт парної кореляції, який даний регресор (його стовпчик) має з іншими регресорами, що входять у модель; ім'я цього регресора; коефіцієнт кореляції з відгуком. Таблиця мультиколінеарності дозволяє проаналізувати стійкість структури рівняння регресії. Для цього бажано, щоб виконувалися наступні умови:

- максимальний коефіцієнт парної кореляції між регресорами не перевищував би за абсолютною величиною 0,3...0,4;
- коефіцієнт парної кореляції з відгуком за абсолютною величиною повинен бути істотно більшим. Ніж максимальний коефіцієнт кореляції з іншим регресором.

Проведення розрахункового експерименту представляє собою вже безпосереднє використання моделі для вивчення процесу. При цьому фізичний об'єкт замінюється побудованою моделлю. Тобто, для пошуку найоптимальнішої точки на основі експериментальних даних будуються багатфакторні математичні моделі критеріїв якості, потім за цими моделями та результатами проводиться багатопараметрична компромісна оптимізація.

Процедура визначення рангів та вагових коефіцієнтів полягала в використанні експертних оцінок, згідно яких експерт оцінює важливість критеріїв оптимізації в порівнянні між собою. Після визначення вагових коефіцієнтів проводиться обробка одержаних результатів на предмет їх узгодженості

Визначення рангів проводилося за формулою:

$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} M_i}{n_i}. \quad (18)$$

де M_i – місце значимості i -го показника;

n_i – кількість експертів в оцінці даного показника.

Вагові коефіцієнти визначалися за формулою:

$$K_i = 1 - \frac{P_i - P_{i\min}}{m - 1} \cdot d. \quad (19)$$

де P_i – ранг поточного i -го показника;

$P_{i\min}$ – ранг i -го показника, що має найважливіше значення;

m – кількість показників;

d – діапазон зміни вагових коефіцієнтів показників (0,5...1);

K_i – ваговий коефіцієнт i -го показника.

Для перевірки узгодженості висновків експертів розроблено спеціальну методику, яка використовує для цієї мети коефіцієнт конкордації, запропонований свого часу Кендалом:

$$W = \frac{12}{m^2(n^3 - n)} \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m \left(R_{ij} - \frac{n+1}{2} \right) \right)^2, \quad (20)$$

де n – кількість параметрів (об'єктів), що оцінюють експерти;

m – кількість експертів;

R_{ij} – ранг j -го об'єкта (параметра), призначений йому i -м експертом.

Для перевірки статистичної значущості вибіркового значення коефіцієнта конкордації скористаємося величиною $\chi^2_{2\alpha}$; $n-1$ – α -процентна точка χ^2 -розподілу зі ступенями вільності $(n - 1)$, її беруть з таблиці. Наближене значення $\chi^2_{2\alpha}$; $n-1$ -роподіленої величини дорівнює $m(n - 1)W$. Якщо станеться так, що умова $m(n - 1)W > \chi^2_{2\alpha}$; $n-1$ виконується, то гіпотеза про відсутність рангового множинного зв'язку між оцінками експертами параметрів має бути відкинута.

Якщо задано кілька критеріїв оптимізації, то їх спільні значення вибирають використовуючи принцип компромісу за Парето

$$Y[x_1, x_2, \dots, x_k] = Y[y_1 = \min, y_2 = \max, \dots, y_k = \min] = opt, \quad (21)$$

де Y – узагальнений критерій оптимальності об'єкту оптимізації, одержаний шляхом використання принципу компромісу за Парето.

Ідея компромісу за Парето полягає в пошуку таких умов функціонування системи, за якими узагальнений критерій оптимальності її досягає екстремального значення.

При оптимізації за моделями в роботі використано метод випадкового пошуку на основі ЛПт рівномірно розподілених випадкових точок. Крім того, при ЛПт пошуку пробні точки в багатомірному просторі розміщені найкращим чином з точки зору зондування цього простору. Алгоритм пошуку оптимальної точки у факторному просторі виглядає таким чином.

Крок 1. Розрахунок значень критеріїв за моделями на основі одержаної матриці натуральних значень.

Крок 2. Розрахунок узагальненого критерію оптимізації $y_{узаг.}$

$$y_{узаг.} = \sqrt{\sum_{j=1}^m [1 - D_{jr}]^2 \cdot W_j^2}, \quad (22)$$

де $y_{узаг.}$ – значення узагальненої цільової функції для r -го дослідження експерименту, яка у випадку пошуку оптимальних умов прагне до 0 ($y_{узаг.} \rightarrow 0$) і є оцінкою близькості цієї точки до гіпотетичного оптимального значення, що дорівнює 1;

D_{jr} – зведене до інтервалу 0...1 значення j -го відгуку (критерію оптимізації) у r -му досліді експерименту, залежно від обраної для певного критерію оптимізації мети це значення обчислюється за різними формулами;

W_j – вага j -го критерію оптимізації (відгуку);

m – кількість критеріїв якості (відгуків).

Значення D_{jr} обчислюють за допомогою таких формул:

а) метою j -го критерію оптимізації (відгуку) є МАКСИМУМ

$$D_{jr} = 1 - \frac{y_{j\max} - y_{jr}}{y_{j\max} - y_{j\min}}, \quad (23)$$

$$D_{jr} = 1 + \frac{y_{j\max} - y_{jr}}{y_{j\max} - y_{j\min}}. \quad (24)$$

де $y_{j\max}$ і $y_{j\min}$ – відповідно максимальне та мінімальне значення j -го критерію якості (відгуку) серед N дослідів (пробних точок);

б) метою j -го критерію оптимізації (відгуку) є МІНІМУМ

Крок 3. Пошук найменшого значення, обчисленого у кожній пробній точці узагальненого критерію оптимізації, якому відповідає максимальне значення $y_{\text{ефект}}$
 $y_{\text{ефект}} = 1 - y_{\text{узаг}}$. Точка факторного простору, якій відповідає найменше значення узагальненого критерію оптимізації, є оптимальною, а відповідний рядок з матриці натуральних значень є оптимальним значенням параметрів (факторів), що впливають на технологічний процес.

У зв'язку з тим, що розрахунок за математичними моделями та результатами експериментальних досліджень значень критеріїв оптимізації у пробних точках є трудомістким в роботі використано ППП ПРИАМ.

На останньому етапі проводиться узагальнення досліджень, формулюються висновки та рекомендації щодо впровадження технологічного процесу.

Висновок. В роботі розроблена методика планування експерименту і побудови математичної моделі процесу зміцнення поршнів автотракторних двигунів вакуумним азотуванням в пульсуючому пучку плазми з використанням методу випадкового пошуку на основі ЛПТ рівномірно розподілених випадкових точок, пакету прикладних програм “Планування, регресія й аналіз моделей», теорія планування експерименту та математичної статистики.

Список літератури

1. Толбатов Ю.А. Математична статистика та задачі оптимізації в алгоритмах і програмах. Київ: Вища школа, 1994. 399 с.
2. Радченко С.Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении. Киев: ЗАО «Укрспецмонтажпроект», 1998. 274 с.
3. Радченко С.Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: навч. посібн. Київ: ІВЦ “Політехніка”, 2001. 88 с.
4. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. Москва: Металлургия, 1969. 158 с.
5. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. Москва: Наука, 1981. 111 с.
6. Ермаков С.М., Бродский В.З., Жигляевский А.А. Математическая теория планирования эксперимента. Москва: Наука, 1983. 392 с.
7. Программные продукты Украины. Планирование, регрессия и анализ модели ПРИАМ / НТУ КПИ; под ред. С.Н. Лапач, С.Г. Радченко, П.Н. Бабич. Киев: СП «Текпор», 1993. С. 24-27.

References

1. Tolbatov, Yu.A. (1994). Matematychna statystyka ta zadachi optymizatsii v alhorytmakh i prohramakh [Mathematical statistics and optimization problems in algorithms and programs]. Kyiv: Vyscha shkola [in Ukrainian].
2. Radchenko, S.G. (1998). Matematicheskoe modelirovanie tehnologicheskikh processov v mashinostroenii [Mathematical modeling of technological processes in mechanical engineering]. Kyiv: ZAO «Ukrspetsmontazhpriekt» [in Russian].
3. Radchenko, S.H. (2001). Matematychni modeliuvannia ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system: Navchal'nyj posibnyk [Mathematical Modeling and Optimized Technological Systems]. Kyiv: IVTs "Politekhnik" [in Russian].
4. Adler, Ju.P. (1969). Vvedenie v planirovanie zksperimenta [Introduction to Experiment Planning]. Moscow: Metallurgija [in Russian].
5. Sobol', I.M., Statnikov, R.B. (1981). Vybory optimal'nykh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami [The choice of optimal parameters in problems with many criteria]. Moscow: Nauka [in Russian].
6. Ermakov, S.M., Brodskij, V.Z., Zhigljavskij, A.A. (1983). Matematicheskaja teorija planirovaniia zksperimenta [Mathematical theory of experiment planning]. Moscow: Nauka [in Russian].
7. Lapach, S.N., Radchenko, S.G., Babich, P.N. (Eds.). (1993). Programmnye produkty Ukrainy. Planirovanie, regressija i analiz modeli PRIAM [Model planning, regression, and analysis]. Kiev: SP «Tekpor» [in Russian].

Anatoly Rudkovsky, PhD tech. sci, Senior Researcher

National Academy of sciences of Ukraine G.S. Pisarenko institute for problems of strength, Kyiv, Ukraine

Sergiy Markovych, Assos. Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Myhajlyta**, post-graduate

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Method of Planning of Experiment and Construction of Mathematical Model of Process of Strengthening of Pistons of Auto of Tractor Engines a Vacuum Nitriding in the Pulsating Bunch of Plasma

In-process developed method of planning of experiment and construction of mathematical model by a calculable experiment, which will allow to conduct the search of the optimum technological modes of forming of diffusive layers a vacuum nitriding in a pulsating bunch plasma which will provide the increase of resistance the isothermal and thermal-cycle creep of pistons.

The decision of task was conducted after the followings stages: formalization of task, constructing of plan of experiment, leadthrough of experiment, previous statistical analysis of results of experiment, construction of mathematical models as a result of experiment, analysis of quality of the got model, leadthrough of calculation experiment, forming of conclusions and recommendations.

After the leadthrough of formalization constructing of plan of experiment is executed.

In this work it is suggested to utilize the plan of experiment which is generated on the basis of LP_f –numbers.

Constructing of plan of experiment was in-process conducted by PPP PRIAM (application “Planning, regression and analysis of models package»). The got plan is a matrix every line of which contains the encoded values of independent variables for every level.

Construction of mathematical models as a result of experiment passed in two stages: choice of structure of equalization of regression and receipt of values of coefficients of regression and them statistical descriptions.

For that, to estimate the level of informing in number, utilized the criterion of Boksa-Veca. Verification of adequacy of the got model is taken to verification after the criterion of Fishera.

On the last of peat-time conducted generalization of researches, conclusions and recommendations are formulated in relation to introduction of technological process.

vacuum nitriding, mathematical model, plan of experimen, criterion

Одержано (Received) 20.11.2018

Прорецензовано (Reviewed) 5.12.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 621.9.048.7:621.373.826:631.31 DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.54-61>

Ю.О. Ковальчук, доц., канд. техн. наук, **І.О. Лісовий**, канд. техн. наук
Уманський національний університет садівництва, м. Умань, Україна
e-mail: temp@eml.ua

Дослідження структури та мікротвердості обробленої лазером поверхні чавунів

Проаналізовано вплив лазерної обробки на властивості поверхневого шару чавуну. Визначено структуру та мікротвердість зон лазерного впливу для чавуну марок СЧ21 і ВЧ40. Відмічено, що застосування швидкого сканування лазерного пучка поперек напрямку руху забезпечує згладжування поверхневого рельєфу оплавленого шару та поліпшення форми перерізу загартованої смуги, наближаючи її до прямокутної. Досліджено, що для зміцнення чавунів крім потужних СО₂-лазерів можуть ефективно використовуватися твердотільні YAG-лазери потужністю від 400 Вт і вище.
метод поверхневої лазерної обробки, лазерне зміцнення, гартування, чавун, зносостійкість, деталі сільськогосподарської техніки

Ю.А. Ковальчук, доц., канд. техн. наук, **И.А. Лисовый**, канд. техн. наук
Уманский национальный университет садоводства, г. Умань, Украина

Исследование структуры и микротвердости обработанной лазером поверхности чугунов

Проанализировано влияние лазерной обработки на свойства поверхностного слоя чугуна. Определена структура и микротвердость зон лазерного воздействия для чугуна марок СЧ21 и ВЧ40. Отмечено, что применение быстрого сканирования лазерного пучка поперек направления движения обеспечивает сглаживание поверхностного рельефа оплавленного слоя и улучшения формы сечения закаленной полосы, приближая ее к прямоугольной. Исследовано, что для упрочнения чугунов кроме мощных СО₂-лазеров могут эффективно использоваться твердотельные YAG-лазеры мощностью от 400 Вт и выше.

метод поверхностной лазерной обработки, лазерное упрочнение, закаливание, чугун, износостойкость, детали сельскохозяйственной техники

Постановка проблеми. Нині не втрачає своєї актуальності питання збільшення ресурсу виробітку різних деталей сільськогосподарської техніки із чавуну. Однією із першочергових задач, що стоять перед виробниками сільськогосподарських машин, є забезпечення вищої міцності та зносостійкості деталей, які найбільше піддаються зносу та виходять з ладу.

Для зміцнення різноманітних деталей сільськогосподарської техніки може застосовуватися метод поверхневої лазерної обробки. Він є одним з методів покращення характеристик деталей сільськогосподарської техніки із чавуну.

Лазерна обробка може забезпечити значне підвищення міцності, а при правильному виборі марки сплаву, режимів застосування лазерного випромінювання та подальшій обробці зміцнених зразків – ще й підвищення пластичності, ударної в'язкості та зносостійкості матеріалу.

Однак, різні дослідження виконуються за різних умов лазерної обробки. Не відбувається їх систематизації та узагальнення.

Тому актуальним та важливим на даний момент є системне дослідження впливу лазерного випромінювання на зміцнювану поверхню чавуну для подальшого забезпечення потрібних характеристик відповідних деталей сільськогосподарської техніки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженнями лазерної обробки деталей сільськогосподарської техніки займалися як наші вітчизняні вчені [1-5], так і вчені за кордоном [6-11]. Дані дослідження потребують достатньо потужну матеріальну базу та відповідне фінансування. Впровадження останніх досягнень лазерних технологій у сільське господарство, а, зокрема, у зміцнення різних деталей відповідної техніки, є непростим та затратним у відношенні як відповідних матеріальних ресурсів, так і стосовно необхідного часу для проведення дослідів та аналізу отриманих результатів, розробки конкретних технологій лазерної обробки деталей сільськогосподарської техніки.

Питаннями, що пов'язані із впливом лазерного випромінювання на характеристики чавуну займався, зокрема, А.Г. Григор'янц в праці [8]. В даній роботі досліджувався вплив деяких параметрів процесу лазерної обробки на отримувані характеристики чавунів та особливості внутрішніх перетворень в даному сплаві під дією лазерного променя.

Дослідженням структури та властивостей зон перекриття в результаті лазерної обробки та підвищенням експлуатаційних характеристик деталей із чавуну шляхом застосування оптоволоконного лазера останнім часом займався, зокрема, П.А. Огін [7, 10]. Лазерне зміцнення колінчатих валів із чавуну досліджував також О.С. Завойко [1].

Залишкові напруження на поверхні залізобетонних сплавів, їх значення та знаки під час лазерної обробки досліджували А.Г. Григор'янц [8], В.С. Майоров [6] та інші вітчизняні та закордонні вчені.

Дані дослідження переважно мають несистемний характер та не охоплюють все коло пов'язаних із лазерним зміцненням питань. Узагальнення різних досліджень відбувається недостатньо. Отримані результати конкретних досліджень та їх пояснення одними авторами не є очевидними для інших авторів, результати яких отримуються при в значній мірі подібних параметрах процесу лазерної обробки.

Існує об'єктивна необхідність узагальнення отриманих результатів різних авторів, їх систематизації та розробки більш широкої системи знань щодо процесу лазерного зміцнення сплавів.

Зокрема, потребує більш глибокого та різностороннього дослідження структура та мікротвердість поверхневого шару чавуну в результаті впливу лазерного випромінювання.

Постановка завдання. Метою роботи є визначення впливу лазерної зміцнюючої обробки на структуру та мікротвердість поверхневого шару чавуну для покращення експлуатаційних характеристик відповідних деталей сільськогосподарської техніки.

Виклад основного матеріалу. Чавун має гарні ливарні властивості, високі показники міцності та піддається механічній обробці.

Для ефективного застосування лазерної обробки деталей із чавуну потрібно мати чіткі уявлення про структуру та мікротвердість зміцненого лазером поверхневого шару. Це дозволить, у свою чергу, розробити технології лазерної обробки чавунних виробів із забезпеченням необхідного рівня міцності та зносостійкості.

Для оптимізації технологічного процесу гартування поверхні чавунів лазером необхідно оцінити вплив тривалості дії випромінювання τ на структуру та твердість даних сплавів.

Так, здійснюючи лазерну обробку безперервним CO₂-лазером, при зміні τ для чавуну СЧ21 в межах 0,16-1,2 с, швидкість охолодження нагрітого об'єму металу перевищує критичну швидкість загартування, про що свідчить характер отриманих в зоні лазерного впливу (ЗЛВ) структур (рис. 1) та їх твердість (рис. 2) [6].

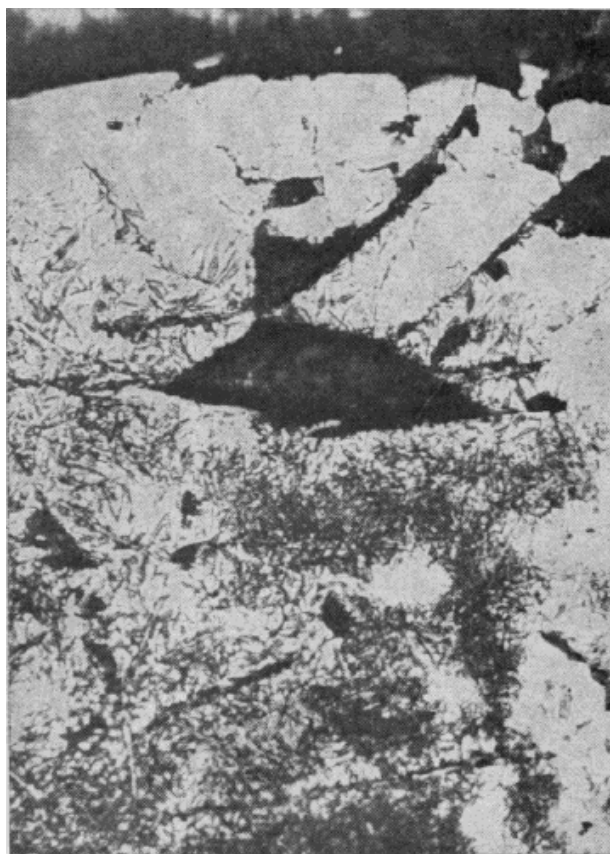
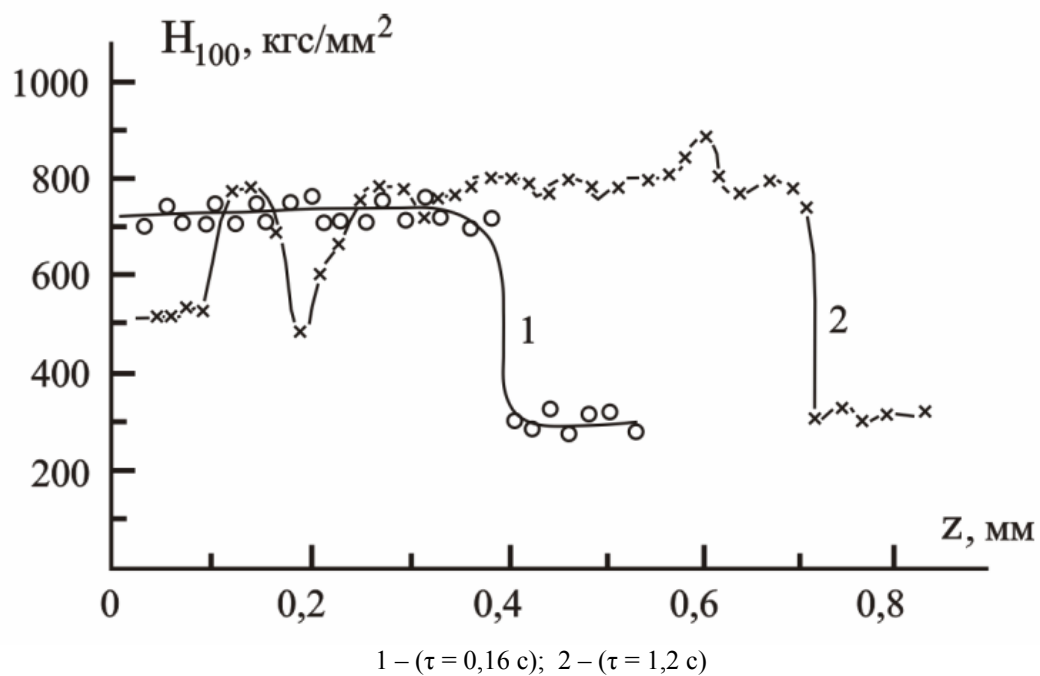


Рисунок 1 – Структура чавуну СЧ21 в зоні лазерного впливу при $\tau = 1,2$ с (x500)
Джерело: розроблено автором на підставі [6]



1 – ($\tau = 0,16$ с); 2 – ($\tau = 1,2$ с)
Рисунок 2 – Розподіл мікротвердості за глибиною зони лазерного впливу
в чавуні СЧ21 ($P_0 = 2,2$ кВт)

Джерело: розроблено автором на підставі [6]

На співвідношення аустенітної та мартенситної складових в чавуні СЧ21 в структурі ЗЛВ істотно впливає тривалість впливу випромінювання. Зі збільшенням τ в приповерхневому шарі та в глибині ЗЛВ з'являються окремі ділянки залишкового аустеніту (рис. 1) з мікротвердістю $H_{100} = 500-560$ кгс/мм². В глибинних областях ЗЛВ аустеніт локалізується навколо включень фосфідної евтектики, тобто в найбільш збагачених вуглецем ділянках.

Структурна неоднорідність за глибиною ЗЛВ, що виникає при збільшенні τ , супроводжується нерівномірним розподілом твердості. На кривій мікротвердості, що відповідає $\tau = 1,2$ с (рис. 2), є провали, пов'язані з попаданням індентора мікротвердоміру ПМТ-3 на аустенітні ділянки. Спостережуване збільшення кількості залишкового аустеніту з ростом τ , ймовірно, пов'язане з великим насиченням твердого розчину вуглецем.

Вибір режиму гартування чавуну СЧ21 та відповідного йому структурного стану в ЗЛВ повинен проводитися з урахуванням умов експлуатації конкретної деталі, так як аустеніт може надавати різний вплив на зносостійкість. Стосовно пари тертя, наприклад, циліндр двигуна – компресійне кільце, залишковий аустеніт може сприяти кращому припрацюванню даної пари.

Застосування швидкого сканування лазерного пучка поперек напрямку руху забезпечує поліпшення форми перерізу загартованої смуги, наближаючи її до прямокутної, і згладжування поверхневого рельєфу оплавленого шару.

Для лазерного зміцнення високоміцного чавуну ВЧ40 з оплавленням використовувався твердотільний YAG-лазер з двокоординатним сканатором потужністю $P_0 = 400$ Вт при наступних параметрах обробки: швидкість переміщення зразка $V = 1,7$ см/с, радіус лазерного пучка $R = 0,5$ мм, амплітуда сканування $q = 2,6$ мм, частота сканування $f = 160$ Гц [6].

Після лазерної обробки відповідні шліфи зразків досліджувалися традиційними металографічними методами.

Форма перерізу загартованих смуг стала близька до прямокутної. Глибина зони оплавлення складала $0,05...0,1$ мм, зони гартування з твердого стану – $0,1...0,15$ мм, а загальна глибина гартування – $0,15...0,25$ мм. Ширина загартованої смуги – $2,7...3,1$ мм. Мікротвердість вибіленого шару високоміцного чавуну ВЧ40 складала $7 \cdot 10^3...8,7 \cdot 10^3$ МПа, а в зоні лазерного гартування з твердого стану для аустенітно-мартенситної структури – $6 \cdot 10^3...7,5 \cdot 10^3$ МПа.

Структура зони лазерної обробки чавуну ВЧ40 зображена на рис. 3, а характерний розподіл значень мікротвердості за глибиною зони лазерної обробки наведено на рис. 4 [6]. Розкид значень геометричних розмірів та мікротвердості пов'язаний з відмінностями у вихідній структурі сплаву зразків з різних партій лиття, а також не завжди стабільною якістю фосфатування та, відповідно, коефіцієнтом поглинання лазерного випромінювання.

Лазерна обробка чавунів з оплавленням призводить до розчинення графіту в розплаві, внаслідок чого в зоні оплавлення (світла смуга на рис. 3) при кристалізації формується структура вибіленого чавуну. Після лазерної обробки в цій зоні майже не спостерігаються залишки графітних включень. Це пов'язано з використанням швидкого поперечного сканування, коли на кожен ділянку оброблюваної поверхні протягом доли секунди фактично діє послідовність багатьох десятків лазерних імпульсів (джерело тепла носить імпульсно-періодичний характер).

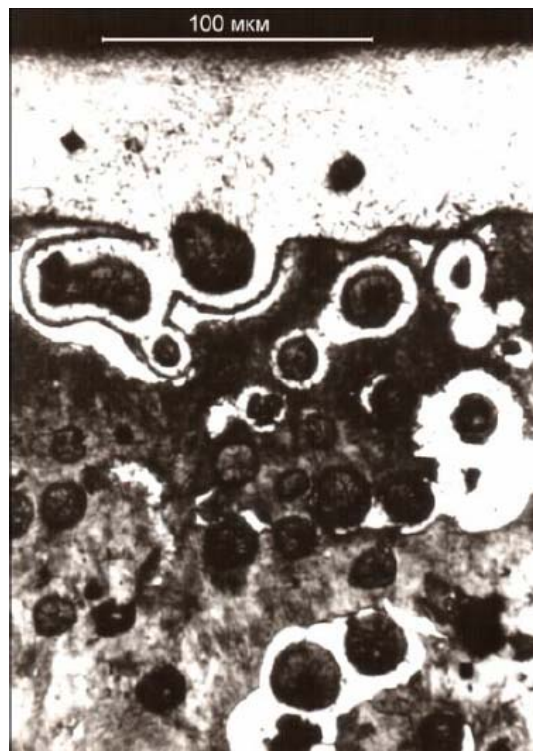


Рисунок 3 – Зона лазерного гартування чавуну ВЧ40 (х200)

Джерело: розроблено автором на підставі [6]

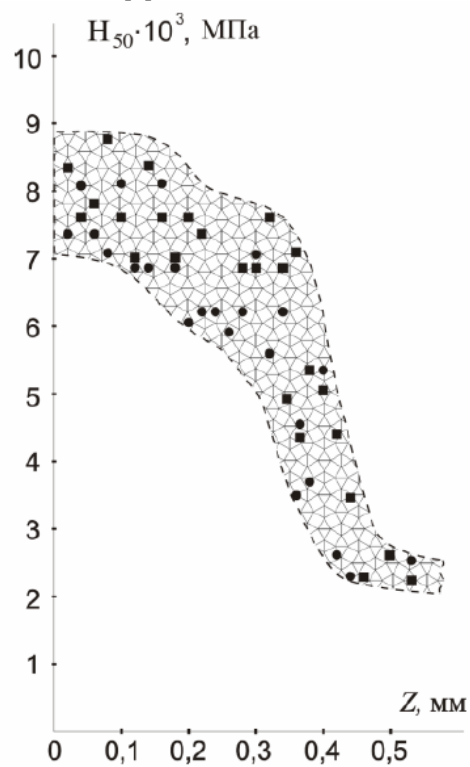


Рисунок 4 – Розподіл мікротвердості за глибиною зони лазерної обробки чавуну ВЧ40

Джерело: розроблено автором на підставі [6]

Повне розчинення графіту створює умови для збільшення частки цементиту. Кристалізація відбувається при високих швидкостях охолодження і здійснюється за механізмом, близьким до квазіевтектичного без виділення вільного графіту. У структурі вибіленого чавуну спостерігається вирівнювання концентрації кремнію, сама структура значно подрібнена. Між осередками аустеніту в міждендритних проміжках структура має вигляд нерівноважної суміші заевтектичного виду з великою кількістю цементиту, що визначає високу твердість цієї зони.

Зона гартування з твердої фази має дуже неоднорідну структуру. У її верхній частині (поблизу нижньої межі зони оплавлення) навколо графітних включень є світлі смуги в 10...20 мкм, які свідчать про те, що тут мало місце локальне оплавлення та значне насичення матриці вуглецем з графітних включень. При насиченні до формування аустеніто-цементитної структури мікротвердість цих смуг досить висока.

Поруч з графітом утворюється шар з переважанням цементиту, далі – пластинчастий ледебурит, ледебурит і аустеніт, однорідний аустеніт та, нарешті, аустенітно-мартенситна голчата структура. У середній області зони гартування з твердої фази є чергування світлих та темних ділянок, що обумовлюється насиченням матриці вуглецем до різного рівня на різних відстанях від графітних включень. У нижній частині насичення матриці вуглецем незначне.

Таким чином, виконуються загальні вимоги до результатів лазерного гартування. Ресурс роботи відповідних зміцнених деталей сільськогосподарської техніки в результаті застосування методу поверхневої лазерної обробки значно збільшиться.

Проведені дослідження підтвердили, що технологічні установки з твердотільними лазерами потужністю від 400 Вт і вище можуть ефективно використовуватися для поверхневого гартування залізовуглецевих сплавів та успішно конкурувати з більш потужними CO₂-лазерами.

Висновки. Отже, поверхнева лазерна обробка може бути успішно застосована також і для використовуваного вітчизняними виробниками деталей сільськогосподарської техніки чавуну, що надасть змогу забезпечити значне підвищення експлуатаційних характеристик відповідних виробів та створить передумови для заміни чавуном у певних випадках значно дорожчих сталей.

Внаслідок можливості аустеніту надавати різний вплив на зносостійкість сплавів вибір режиму гартування чавуну СЧ21 та відповідного йому структурного стану в ЗЛВ повинен проводитися з урахуванням умов експлуатації конкретної деталі. Наприклад, для пари тертя циліндр двигуна – компресійне кільце залишковий аустеніт може сприяти кращому припрацюванню даних деталей.

Застосування швидкого сканування лазерного пучка поперек напрямку руху забезпечує згладжування поверхневого рельєфу оплавленого шару та поліпшення форми перерізу загартованої смуги, наближаючи її до прямокутної.

Внаслідок лазерного гартування високоміцного чавуну ВЧ40 при вказаних в роботі параметрах мікротвердість вибіленого шару складала $7 \cdot 10^3$... $8,7 \cdot 10^3$ МПа, а в зоні лазерного гартування з твердого стану для аустенітно-мартенситної структури – $6 \cdot 10^3$... $7,5 \cdot 10^3$ МПа.

Для поверхневого гартування залізовуглецевих сплавів крім потужних CO₂-лазерів можуть ефективно використовуватися технологічні установки з твердотільними YAG-лазерами потужністю від 400 Вт і вище.

Розробка та впровадження у виробництво конкретних технологій лазерного зміцнення деталей сільськогосподарських машин із чавуну стане можливим за умови підтримки даних досліджень з боку держави.

Список літератури

1. Завойко О.С. Дослідження лазерного зміцнення колінчатих валів та механіко-термічної обробки при руйнуванні на втому та знос. *Фізика і хімія твердого тіла*, 2014. Т. 15, № 4. С. 846–855.
2. Черненко В.С., Кіндрачук М.В., Дудка О.І. Променеві методи обробки: навч. посібник. Київ: Кондор, 2008. 166 с.
3. Пашкова Г.І. Підвищення працездатності чавунних колінчастих валів потужних транспортних дизелів комбінованими методами зміцнення: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т. Харків, 2008. 24 с.
4. Ковальчук Ю.О., Невзоров А.В., Кравченко В.В. Застосування лазерної обробки сталі 45 для підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських машин. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*, 2015. Вип. 3. С. 171–176.
5. Бобрицький В.М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04 / Національний транспортний ун-т. Київ, 2007. 20 с.
6. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В.Я. Панченко. Москва: Физматлит, 2009. 664 с.
7. Огин П.А. Повышение эксплуатационных характеристик деталей из чугунов с применением закалки оптоволоконным лазером. *Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института. Серия «Технические науки»*, 2015. № 12 (55). С. 55–58.
8. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца; 2-е изд., стереотип. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 664 с.
9. Бирюков В.П. Повышение износостойкости деталей сельскохозяйственной техники и почвообрабатывающих орудий лазерным упрочнением и наплавкой. *Лазерные технологии в сельском хозяйстве: тематический сборник*. Москва: Техносфера, 2008. С. 256–264.
10. Огин П.А. Структура и свойства зон перекрытия при лазерной закалке сталей и чугунов. Вектор науки Тольяттинского государственного университета, 2015. № 2 (32-2). С. 130–135.
11. Буханова И.Ф., Дивинский В.В., Журавель В.М. Применение лазерного излучения для упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственного машиностроения. *Лазерные технологии в сельском хозяйстве: тематический сборник*. Москва: Техносфера, 2008. С. 264–270.

References

1. Zavoiko, O.S. (2008). Doslidzhennia lazernoho zmitsnennia kolinchatykh valiv ta mekhaniko-termichnoi obrobky pry ruinuванні na vtomu ta znos [Investigation of laser hardening of crankshafts and mechanical-thermal treatment in case of fatigue and wear destruction]. *Fizyka i khimiia tverdoho tila – Physics and Chemistry of the Solid State*, Vol. 15, 4, 846-855 [in Ukrainian].
2. Chernenko, V.S., Kindrachuk, M.V., & Dudka, O.I. (2008). *Promenevi metody obrobky [Radial processing methods]*. Kyiv: Kondor [in Ukrainian].
3. Pashkova, H.I. (2008). Pidvyshchennia pratsezdatsnosti chavunnykh kolinchastykh valiv potuzhnykh transportnykh dyzeliv kombinovanyimi metodamy zmitsnennia [Improvement of efficiency of cast-iron crankshafts of powerful transport diesel engines by combined methods of strengthening]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kharkiv [in Ukrainian].
4. Kovalchuk, Yu.O., Nevzorov, A.V., & Kravchenko, V.V. (2015). Zastosuvannia lazernoi obrobky stali 45 dlia pidvyshchennia znosostiikosti detalei silskohospodarskykh mashyn [Application of laser treatment of steel 45 to improve the wear resistance of parts of agricultural machines]. *Visnyk Ukrainiskoho viddilennia Mizhnarodnoi akademii ahrarnoi osvity – Bulletin of the Ukrainian Branch of the International Academy of Agrarian Education*, issue 3, 171-176 [in Ukrainian].
5. Bobrytskyi, V.M. (2007). Pidvyshchennia znosostiikosti rizalnykh elementiv robochykh orhaniv ґрунтоobrobnykh mashyn [Increase wear-resistance of cutting elements of working bodies of soil-working machines]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].

6. Panchenko, V.Ja. (Eds.). (2009). *Lazernye tehnologii obrabotki materialov: sovremennye problemy fundamental'nyh issledovanij i prikladnyh razrabotok [Laser technologies for processing materials: modern problems of fundamental research and applied development]*. Moskva: Fizmatlit [in Russian].
7. Ogini, P.A. (2015). Povyshenie jekspluatacionnyh harakteristik detalej iz chugunov s primeneniem zakalki optovolokonnyim lazerom [Improving the performance of parts made of cast iron using hardening with a fiber-optic laser]. *Vestnik Nizhegorodskogo gosudarstvennogo inzhenerno-jekonomicheskogo instituta. Serija «Tehnicheskie nauki» – Bulletin of the Nizhny Novgorod State Engineering and Economic Institute. Series «Technical Sciences»*, 12 (55), 55-58 [in Russian].
8. Grigor'janc, A.G., Shiganov, I.N., & Misjurov, A.I. (2008). Tehnologicheskie processy lazernoj obrabotki [Technological processes of laser handling]. A.G. Grigor'janc (Ed.) (2-d ed.). Moskva: Izd-vo MGTU im. N.Je. Bauman [in Russian].
9. Birjukov, V.P. (2008). Povyshenie iznosostojkosti detalej sel'skohozhajstvennoj tehniki i pochvoobrabatyvajushhih orudij lazernym uprochneniem i naplavkoj [Increasing the durability of parts of agricultural machinery and tillage tools with laser hardening and surfacing]. *Lazernye tehnologii v sel'skom hozjajstve – Laser technologies in agriculture*. Moskva: Tehnosfera [in Russian].
10. Ogini, P.A. (2015). Struktura i svoystva zon perekrytija pri lazernoj zakalke stalej i chugunov [The structure and properties of overlap zones in laser hardening of steels and cast irons]. *Vektor nauki Tol'jattinskogo gosudarstvennogo universiteta – Science vector of Togliatti State University*, 2 (32-2), 130-135 [in Russian].
11. Buhanova, I.F., Divinskij, V.V., & Zhuravel, V.M. (2008). Primenenie lazernogo izluchenija dlja uprochnenija i vosstanovlenija detalej sel'skohozhajstvennogo mashinostroenija [The use of laser radiation for hardening and restoration of agricultural engineering parts]. *Lazernye tehnologii v sel'skom hozjajstve – Laser technologies in agriculture*. Moskva: Tehnosfera [in Russian].

Yuriy Kovalchuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Lisoviy**, PhD tech. sci.
 Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

Investigation of the Structure and Microhardness of the Laser-treated Surface of the Cast Irons

The purpose of this work is to study the method of surface laser treatment regarding the effect of laser radiation on the structure and microhardness of laser influence zones in the surface layer of cast iron to improve performance characteristics such as hardness and wear resistance of the corresponding parts of agricultural machinery.

The ratio of austenitic and martensitic components in SCh21 cast iron in the structure of the hardened layer is significantly affected by the duration of the radiation effect. With its increase in the near-surface layer and in the depth of the laser-impact zone, separate areas of residual austenite with microhardness $H_{100} = 500-560$ kgf/mm² appear. In the deep areas of the hardened layer, austenite is localized around phosphide eutectic inclusions, that is, in the most carbon-rich areas. Due to laser hardening of high-strength HF40 cast iron with the parameters specified in the work, the microhardness of the bleached layer was $7 \cdot 10^3 \dots 8.7 \cdot 10^3$ MPa, and in the laser hardening zone from the solid state for austenitic-martensitic structure - $6 \cdot 10^3 \dots 7.5 \cdot 10^3$ MPa. The choice of the hardening mode of cast iron SCh21 and the corresponding structural state in the zone of laser influence should be carried out taking into account the operating conditions of a particular part, since austenite may have a different effect on the wear resistance. For example, with respect to the friction pair of an engine cylinder – a compression ring, residual austenite may contribute to a better running-in of these parts.

The use of fast scanning of a laser beam across the direction of motion provides smoothing of the surface relief of the melted layer and improving the shape of the hardened strip, bringing it closer to a rectangular one. In addition to high-power CO₂ lasers, solid-state YAG lasers with a power of 400 W and more can be effectively used for hardening cast irons. Thus, surface laser treatment can also be successfully applied to cast iron, used by domestic manufacturers of agricultural machinery parts. This will ensure a significant increase in the performance characteristics of the respective products and will create prerequisites for the replacement of significantly more expensive steels with cast irons in certain cases.

method of surface laser treatment, laser hardening, tempering, cast iron, wear resistance, agricultural machinery parts

Одержано (Received) 11.12.2018

Прорецензовано (Reviewed) 17.11.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 621.644:621.833.15

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.62-69>

Ю.В. Кулешков, проф., д-р. техн. наук, **Т.В. Руденко**, доц., канд. техн. наук,
М.В. Красота, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький,
Україна*

e-mail: r-t-v@mail.ua

Енергозберігаючий гідропривід механізму піднімання кузова автомобіля-самоскида

В даній статті запропоновано конструкцію оригінального гідроприводу механізму піднімання кузова автомобіля-самоскиду. Особливістю даної гідросистеми є використання гідроаккумулятора високого тиску, плунжерних насосів, системи керування, при цьому шестеренний насос та його привід від двигуна автомобіля, характерні для серійного механізму піднімання, в пропонованій схемі відсутні. Як джерело енергії, необхідної для піднімання кузова, пропонується використовувати не двигун внутрішнього згорання, як в серійних гідроприводах, а гідроаккумулятор з підзарядженням від коливань підресорених мас автомобіля.

плунжерний насос, робоча рідина, гідравлічний акумулятор

Ю.В. Кулешков, проф., д-р. техн. наук, **Т.В. Руденко**, доц., канд. техн. наук, **М.В. Красота**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Энергосберегающий гидропривод механизма подъема кузова автомобиля-самосвала

В статье предложено конструкцию оригинального гидропривода механизма подъема кузова автомобиля-самосвала. Особенностью данной гидросистемы является использование гидроаккумулятора высокого давления, плунжерных насосов, системы управления, при этом шестеренный насос и его привод от двигателя автомобиля, характерные для серийного механизма подъема, в предложенной схеме отсутствуют. В качестве источника энергии, необходимой для подъема кузова, предлагается использовать не двигатель внутреннего сгорания, а гидроаккумулятор с подзарядкой от колебаний поддресоренных масс автомобиля.

плунжерный насос, рабочая жидкость, гидравлический аккумулятор

Постановка проблеми. На сучасних автомобілях-самоскидах найбільшого поширення набули гідравлічні приводи механізму піднімання кузова. Привід гідравлічного насосу гідроприводу здійснюється від двигуна внутрішнього згорання автомобіля. Існуючі конструкції механізмів піднімання є компактними, надійними, безпечними в роботі, характеризуються плавністю руху кузова і високою швидкістю дії, мають великий термін служби.

Однак, функціонування об'ємного гідроприводу самоскида потребує додаткової витрати енергії на здійснення розвантажувальних операцій та, відповідно, витрати пального, яке витрачається автомобільним двигуном, що негативно позначається на економічній ефективності технологічної експлуатації автомобіля-самоскида.

Дана робота присвячена пошуку нових, енергозберігаючих та ефективних, з економічної точки зору, конструкцій гідроприводів механізму піднімання кузова, а отже є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В процесі вивчення джерел науково-технічної інформації [1-4], були проаналізовані існуючі конструкції механізмів піднімання платформи автомобілів-самоскидів, та встановлено, що найбільш поширеними є ті, що використовують гідравлічний привід. Всі наведені в літературі конструкції ґрунтуються на використанні енергії від двигунів внутрішнього згорання автомобіля.

Постановка завдання. Метою дослідження є пошук альтернативних конструкцій гідроприводу механізму піднімання кузова самоскида, які працюють без споживання енергії від двигуна внутрішнього згорання автомобіля, а отже забезпечують енергозбереження та економічну ефективність технологічної експлуатації автомобіля.

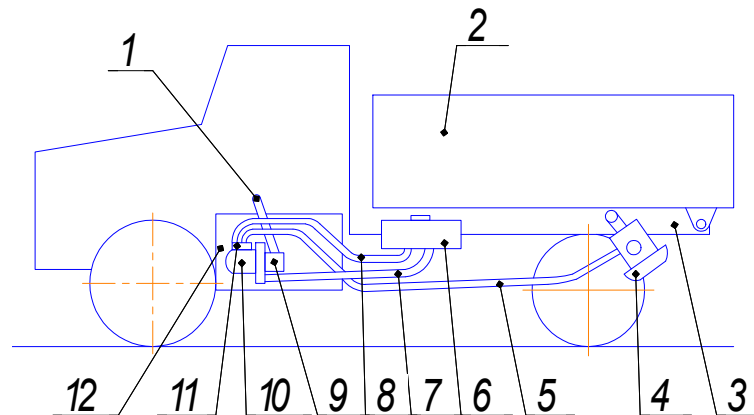
Викладення основного матеріалу. На автомобілях-самоскидах застосовують, в основному, підйомний механізм з гідравлічним приводом, насос якого працює від двигуна внутрішнього згорання автомобіля.

При використанні гідравлічного приводу можливі два варіанти конструкцій підйомного механізму:

- з гідравлічними циліндрами шарнірно з'єднаними з платформою кузова;
- з гідравлічними циліндрами та важільно-балансирною системою руху платформи кузова.

Розглянемо типову конструкцію гідроприводу механізму піднімання на прикладі поширеного автомобіля ЗІЛ.

В гідравлічний привід підйомного механізму самоскида ЗІЛ входять (рис. 1): коробка відбору потужності 9, гідравлічний насос 10, гідравлічний розподільник 11, гідроциліндр 4, масляний бак 6 і трубопроводи 5, 7, 8. Гідравлічний телескопічний циліндр піднімає платформу, повертаючи її відносно нижніх шарнірів кріплення кузова.



- 1 – важіль керування; 2 – платформа; 3 – рама; 4 – гідравлічний циліндр;
 5 – нагнітальна гідролінія; 6 – масляний бак; 7 – всмоктувальна гідролінія; 8 – зливна магістраль;
 9 – коробка відбору потужності; 10 – гідравлічний насос; 11 – гідравлічний розподільник;
 12 – коробка передач

Рисунок 1 – Схема розташування складових підйомного механізму на автомобілі ЗІЛ

Джерело: [1]

Принцип дії гідравлічного приводу підйомного механізму автомобіля ЗІЛ, показаного на рис. 1, полягає в наступному.

При перемиканні важеля керування в положення «Піднімання» золотник гідро розподільника 11 займає положення І, гідравлічний насос 10 всмоктує робочу рідину з

масляного бака 6 по всмоктувальному трубопроводу 7 і подає її по нагнітальному трубопроводу 5 до гідроциліндра 4. Запобіжний клапан відкривається при збільшенні тиску робочої рідини в магістралі до 14 МПа і перепускає її назад в бак по зливній магістралі 8. Під дією тиску робочої рідини з гідравлічного циліндра 4 висувається шток, що призводить до піднімання платформи кузова автомобіля.

При встановленні важеля керування в положення II, під дією ваги кузова, робоча рідина з гідроциліндра через гідролінію, розподільник і зливну магістраль зливається в бак, а шток гідроциліндра заходить назад в гідроциліндр.

Виконаємо аналіз енерговитрат та вартості виконання операцій розвантаження автомобіля-самоскида.

Орієнтовну вартість одного піднімання кузова визначимо на прикладі автомобіля ЗИЛ вантажопідйомністю 6,5 т.

При підніманні кузова довжиною L на кут $\alpha = 55^\circ$, верхня його частина підніметься на висоту

$$h_1 = L \cdot \sin \alpha . \quad (1)$$

При цьому нижня частина кузова, що шарнірно встановлена на рамі автомобіля, відповідно буде знаходитися на висоті $h_2 = 0$.

Тоді, еквівалентна висота піднімання кузова складе

$$h = 0,5 L \sin \alpha . \quad (2)$$

Якщо товщина насипу вантажу складе b , то висота піднімання кузова і вантажу складе

$$h = 0,5 L \sin \alpha + 0,5 b . \quad (3)$$

Тоді, робота, виконана гідравлічним приводом механізму піднімання, складе

$$A = 0,5 \cdot F_T \cdot (0,5 L \sin \alpha + 0,5 b) \quad (4)$$

Знаючи масу вантажу і кузова, знайдемо зусилля, яке необхідно створити гідроциліндру для забезпечення піднімання кузова

$$F_T = (6500 + 1000) \cdot 9,81 = 73575 \text{ Н.}$$

Тоді, при висоті насипу $b = 1,2$ м і довжині кузова $L = 4$ м робота складе

$$A = 0,5 \cdot 73575 \cdot (4 \cdot \sin 55^\circ + 0,5 \cdot 1,2) = 142610 \text{ Дж.}$$

Знайдемо загальний ККД гідравлічного приводу механізму піднімання кузова за формулою

$$\eta_{об} = \prod_{i=1}^k \eta_i . \quad (5)$$

Останній вираз можливо записати у вигляді:

$$\eta_{об} = \eta_{ДВС} \cdot \eta_{ПГ} \cdot \eta_{Г} \cdot \eta_{МП} , \quad (6)$$

де $\eta_{ДВС}$ – ККД двигуна автомобіля, $\eta_{ДВС} = 0,2$;

$\eta_{ПГ}$ – ККД гідравлічного приводу, $\eta_{ПГ} = 0,9$;

$\eta_{МП}$ – ККД механізму піднімання кузова, $\eta_{МП} = 0,7$;

$\eta_{Г}$ – ККД гідросистеми, в свою чергу можна визначити як

$$\eta_{Г} = \eta_{Н} \cdot \eta_{ГР} \cdot \eta_{К} , \quad (7)$$

де $\eta_{Н}$ – ККД шестеренного насоса, $\eta_{Н} = 0,7$;

$\eta_{ГР}$ – ККД гідророзподільника, $\eta_{ГР} = 0,9$;

η_K – ККД клапанних механізмів, $\eta_K = 0,9$;

Тоді, ККД гідросистеми складе.

$$\eta_{Г} = \eta_H \cdot \eta_{ГР} \cdot \eta_K = 0,7 \cdot 0,9 \cdot 0,9 = 0,56.$$

Тоді, загальний ККД приводу складе

$$\eta_{об} = \eta_{ДВЗ} \cdot \eta_{ПГ} \cdot \eta_{Г} \cdot \eta_{МО} = 0,2 \cdot 0,9 \cdot 0,56 \cdot 0,7 = 0,07.$$

Енергія, необхідна для піднімання платформи самоскида, може бути визначена за формулою

$$E = \frac{A}{\eta_{заг}}. \quad (8)$$

Тоді, $E = \frac{142610}{0,07} = 2037285$ Дж.

Теплотворна здатність бензину $Q = 40$ МДж/кг або $Q = 32$ МДж/л

Теплота згорання 1 кг бензину 40 МДж, а 1 л $40 \cdot 0,8 = 32$ МДж.

Тоді, обсяг бензину, витрачений на одне піднімання кузова складе:

$$V_{бен} = \frac{E}{Q_{бен}} = \frac{2037285}{32 \cdot 10^6} = 0,07 \text{ л.} \quad (9)$$

Вартість бензину становить 30 грн/л, отже витрати на паливо, пов'язані з підніманням кузова складуть

$$C_{нід} = 30 \cdot 0,07 = 2,1 \text{ грн.}$$

Прийmemo кількість піднімань кузова за одну зміну 10, тоді

$$C_{нід.зм} = 2,1 \cdot 10 = 21 \text{ грн.}$$

Звідки річні витрати складуть

$$C_p = 21 \cdot 250 = 5250 \text{ грн.}$$

Для зниження енерговитрат та економії палива, що витрачається на виконання технологічної операції піднімання кузова, пропонується внести зміни до конструкції гідроприводу механізму піднімання.

Суть запропонованих змін полягає в тому, що як джерело енергії, необхідної для піднімання кузова, пропонується використовувати не двигун внутрішнього згорання, як в серійних гідроприводах, а гідроаккумулятор з накопиченою від коливань підресорених мас автомобіля енергією робочої рідини.

Для акумулювання енергії, необхідної для піднімання кузова автомобіля пропонується оригінальна гідросистема, схема якої наведена на рис. 2.

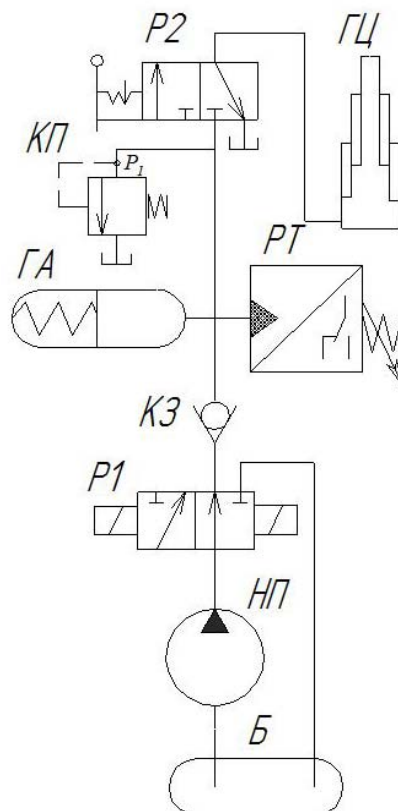


Рисунок 2 – Гідралічна схема об'ємного гідроприводу піднімання кузова самоскида
Джерело: розроблено автором на підставі [5]

Особливістю даної гідросистеми є використання гідроаккумулятора ГА високого тиску, плунжерних насосів НП, системи керування в вигляді клапанів КЗ, КП, реле тиску РТ та розподільників Р1, Р2. При цьому, шестеренний насос та його привід від двигуна автомобіля, характерні для серійного механізму піднімання, в пропонуваній схемі відсутні.

Гідросистема працює в двох режимах: режим накопичення енергії та режим піднімання кузова.

В режимі накопичення енергії робоча рідина, що знаходиться в гідралічному баку Б (рис. 2), по всмоктувальному трубопроводу надходить до плунжерного насоса НП.

Конструктивні особливості та принцип дії даного насоса будуть розглянуті нижче.

На схемі (рис. 2) насос нагнітає робочу рідину до трилінійного двопозиційного гідророзподільника Р1 з електромагнітним керуванням тип 573. В даному режимі роботи гідросистеми розподільник відкритий, і робоча рідина вільно надходить через зворотний клапан КЗ до гідралічного акумулятора ГА. При цьому, розподільник Р2 залишається закритим, в результаті чого гідроаккумулятор ГА починає заряджатись.

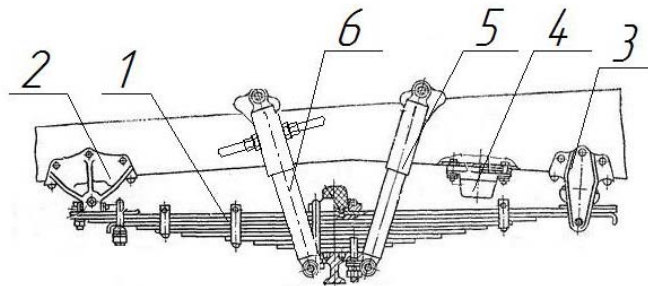
Тиск всередині гідросистеми збільшується до величини налаштування запобіжного клапана КП. Як тільки тиск сягне максимального значення, спрацьовує реле тиску РТ, сигнал з якого надходить до розподільника Р1, в результаті чого насос НП з'єднується із зливною лінією, а на пульті керування у водія спрацює світловий індикатор.

В режимі піднімання кузова водій автомобіля перемикає важіль розподільника Р2 в положення «підйом» і робоча рідина з гідравлічного акумулятора надходить до телескопічного гідроциліндра ГЦ, піднімаючи там самим кузов самоскида.

Після вивантаження кузова, водій перемикає важіль гідророзподільника в положення «опускання», і кузов автомобіля під дією власної ваги опускається донизу, тим самим повертаючи гідроциліндр в початкове положення.

Розглянемо окремо роботу плунжерного насоса НП.

Плунжерний насос 6 (рис. 3) пропонується встановити в підвіску автомобіля, до складу якої входить напівеліптична ресора 1, закріплена своїми кінцями в кронштейнах 2, 3 на рамі автомобіля та зафіксована середньою частиною за допомогою двох стрем'янок на балці мосту автомобіля.



1 – ресора, 2 – переднє кріплення, 3 – заднє кріплення, 4 – буфер, 5 – амортизатор, 6 – плунжерний насос

Рисунок 3 - Підвіска автомобіля з встановленим плунжерним насосом

Джерело: розроблено автором на підставі [3]

При русі автомобіля, відбуваються коливання підресорених мас автомобіля, енергія яких гаситься пружним елементом – ресорою та гідравлічним амортизатором підвіски.

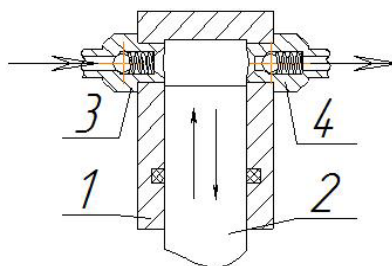
Енергію цих коливань пропонується накопичувати при переміщенні автомобіля з вантажем та використати в подальшому для здійснення технологічної операції піднімання кузова.

Для рекуперації енергії коливань в підвісці пропонується встановлювати плунжерний насос, який працюватиме паралельно з гідравлічним амортизатором 5 (рис. 3).

Конструкція плунжерного насоса представлена на рис. 4. Насос складається з корпусу 1, який шарнірно закріплений на рамі автомобіля, а його плунжер 2 шарнірно з'єднаний з мостом автомобіля.

При русі автомобіля відбуваються коливання підресорених мас автомобіля, при цьому ці маси здійснюють переміщення відносно мосту. Дані переміщення забезпечують роботу плунжерного насоса.

Плунжерний насос працює наступним чином. При русі плунжера насоса догори (рис. 4), робоча рідина, що знаходиться в робочій камері насоса, відкриває нагнітальний клапан 4, звідки потрапляє в нагнітальну лінію гідросистеми. При зворотному русі плунжера насоса, в робочій камері утворюється розрідження, через що відкривається всмоктуючий клапан 3, через який робоча рідина надходить до робочої камери насоса.



1 – корпус, 2 – плунжер, 3 – всмоктуючий клапан, 4 – нагнітальний клапан

Рисунок 4 - Схема роботи плунжерного насоса

Джерело: розроблено автором на підставі [4]

Таких насосів на автомобілі може бути декілька, вони можуть частково виконувати функцію амортизатора підвіски, тому в зміненій конструкції в підвісках можливо використовувати амортизатори меншої енергоємності.

Висновки. В даній статті запропоновано конструкцію оригінального гідроприводу механізму піднімання кузова автомобіля самоскиду.

Особливістю даної гідросистеми є використання гідроаккумулятора високого тиску, плунжерних насосів, системи керування, при цьому шестеренний насос та його привід від двигуна автомобіля, характерні для серійного механізму піднімання, в пропонованій схемі відсутні. Як джерело енергії, необхідної для піднімання кузова, пропонується використовувати не двигун внутрішнього згорання, як в серійних гідроприводах, а гідроаккумулятор з накопиченою від коливань підресорених мас автомобіля енергією робочої рідини.

Розраховано економію, що може бути отримана за рахунок зниження витрати палива при проведенні розвантажувальних операцій одним автомобілем за рік, яка складає 5250 грн.

Список літератури

1. Ершов Б.В., Залетаев М.В. Автомобиль ЗИЛ-130 и его модификации: альбом конструкций автомобиля. Москва: Колос, 1965. 381 с.
2. ЗИЛ-131 и его модификации: руководство по эксплуатации / отв. ред. А.Г. Зарубин. Москва: Машиностроение. 1977. 360 с.
3. В.И. Борисов. Автомобили ГАЗ-53А, ГАЗ 66: руководство по эксплуатации. Москва: Транспорт, 1969. 366с.
4. Круговой В.М., Румшевич И.Н., Мамчур Г.Н. Автомобили КРАЗ. Москва: Транспорт. 1968. 320 с.
5. Объемный гидропривод и гидропневмоавтоматика: учебное пособие / Г.А. Ааврунин и др. Харьков: ХНАДУ, 2008. 412 с.

References

1. Ershov, B.V., Zaletaev, M.V. (1965). Avtomobil' ZIL-130 i ego modifikacii [ZIL-130 car and its modifications]. Moscow. Kolos [in Russian].
2. Zarubin, A.G. (1977). ZIL-131 i ego modifikacii [ZIL-131 and its modifications]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
3. Borisov, V.I. (1969). Avtomobili GAZ-53A, GAZ 66 [Cars GAZ-53A, GAZ 66]. Moscow: Transport [in Russian].
4. Krugovoj, V.M., Rumshevich, I.N., Mamchur, G.N. (1968). Avtomobili KRAZ [KRAZ cars]. Moscow: Transport [in Russian].
5. Aavrunin, G.A., Gricaj, I.V., Kirichenko, I.G., Moroz, I.I., Shherbak, O.V. (2008). Obemnyj gidroprivod i gidropnevmoavtomatika [Volumetric hydraulic drive and hydropneumatic automation]. Kharkov : HNADU [in Russian].

Yuriy Kuleshkov, Prof., Dsc., **Timofey Rudenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mikhail Krasota**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Energy-efficient Hydraulic Actuator of the Dumper Carcass Lift Mechanism

The goal of researching is finding alternative constructions of hydraulic actuator of the carcass lifting device, which are working without using internal combustion engine energy and, consequently, guarantee energy saving and economical effect of technological car using.

In the article it was offered the construction of original hydraulic actuator of the carcass lifting device. The feature of such hydraulic system is using hydraulic accumulator of high pressure, plunger pumps, control systems, herewith gear pump and its drive from car engine, which are specific for serial lifting mechanism, in the offered scheme are not present. As a source of energy, which is needed to lift the carcass, was offered not to use the internal combustion engine, but hydraulic accumulator with recharging from chattering of the car sprung mass.

The feature of this hydrosystem is the use of a high pressure accumulator, plunger pumps, control system, with the gear pump and its drive from the engine of the car, typical for the serial lift mechanism, in the proposed scheme are absent. As a source of energy necessary for lifting the body, it is proposed not to use an internal combustion engine, as in serial hydraulic drives, and a hydraulic accumulator with the energy of the working fluid accumulated from the oscillations of the submerged car's masses.

Was counted the economy, which can be earned by the reducing of the fuel uses, during realization of unloading operations of one car per year.

plunger pump, working fluid, hydraulic accumulator

Одержано (Received) 23.11.2018

Прорецензовано (Reviewed) 11.12.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 681.513.5

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.69-78>

Oleksij Lobok, PhD phys.&math. Sci., **Boris Goncharenko**, Prof., DSc.

National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

Larisa Vihrova, Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Marina Sych, PhD tech. sci.

National University of Bioresources and Natural Resources of Ukraine, Kyiv

Synthesis of Modal Control of Multidimensional Linear Systems in Agricultural Production Based on Linear Matrix Inequalities

The paper gives a solution to the problem of constructing modal regulators for linear multidimensional systems in agricultural production that provide D -stability (asymptotic stability) of the control object. The control is represented as regulators providing feedback on the output of the control object, and uses the full and low order observers of Luenberger. To calculate the matrices of the regulators, we use the technique of linear matrix inequalities and generalize the Lyapunov stability concept (D - stability). The theorems are given which give necessary and sufficient conditions for D - stability of the controlled system.

The constructive solution of the synthesis problem D - stabilizing (modal) regulators according to the measured output of the control object, based on the construction of observers of the state of the object of the complete and reduced order, is given. The solution is based on the use of the theory of linear matrix inequalities (LMI). For numerical simulation of the resulting modal regulators you can use effective methods of convex optimization and corresponding software that is included in a number of application packages, in particular, in the MatLab system. In this paper we describe methods for solving not only the direct problem of modal control, when the choice of parameters of a regulator is ensured by the coincidence of the roots of the characteristic equation of a closed system with a predefined set of complex numbers located on the left side of the complex plane, but also other problems of modal control, in which the requirement the exact placement of the roots in the left integrated half-plane is not superimposed, but only their membership in certain specified areas is required. Such areas, described by a system of linear matrix inequalities (LMI), are called LMI domains.

dynamical system, modal control, regulators, D - stability, Luenberger observers, linear matrix inequalities, kroneker product of matrices

А.П. Лобок, канд. физ.-мат. наук, **Б.Н. Гончаренко**, проф., д-р техн. наук

Національний університет пищевых технологий, Киев, Украина

Л.Г. Вихрова, проф., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Украина

М.А. Сыч, канд. техн. наук

Національний університет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина

Синтез модального управления многомерными линейными системами в сельскохозяйственном производстве на основе линейных матричных неравенств

Дается решение задачи построения модальных регуляторов для линейных многомерных систем в сельскохозяйственном производстве, обеспечивающих D -устойчивость (асимптотическую устойчивость) объекта управления. Управление представлено в виде регуляторов, обеспечивающих обратную связь по выходу объекта управления, и использует наблюдатели Луенбергера полного и пониженного порядка. Для вычисления матриц регуляторов используется техника линейных матричных неравенств и обобщение понятия устойчивости по Ляпунову (D - устойчивость). Приведенные теоремы дают необходимые и достаточные условия D - устойчивости управляемой системы.

В работе дается конструктивное решение задачи синтеза D - стабилизирующих (модальных) регуляторов по измеряемому выходу объекта управления, основанного на построении наблюдателей состояния объекта определенного порядка. Решение получено на основе использования теории линейных матричных неравенств (LMI). Для численного моделирования полученных модальных регуляторов можно использовать методы выпуклой оптимизации и соответствующее программное обеспечение, которое входит в ряд пакетов прикладных программ, в частности, в систему MatLab.

Описаны методы решения не только прямой задачи модального управления, когда выбором параметров регулятора обеспечивается совпадение корней характеристического уравнения замкнутой системы с предварительно заданным набором комплексных чисел, расположенных в левой части комплексной плоскости, но и других задач модального регулирования, в которых требование точного размещения корней в левой комплексной полуплоскости уже не накладывается, а нужна только их принадлежность к некоторым заданным областям, описываемым системой линейных матричных неравенств и называемых LMI-областями.

динамическая система, модальное управление, регуляторы, D - устойчивость, наблюдатели Луенбергера, линейные матричные неравенства, кронекерово произведение матриц

Introduction. Often, in control tasks from the set of stabilization controls, it is necessary to select a subset, which provides for the system additional properties. Such property may be, for example, the location of the roots of the characteristic polynomial of a closed system in a given region of the complex plane. Control having such additional properties is called modal control, and the regulator that provides it is considered modal. Modal control relates to the root methods of linear ACS synthesis, in which, based on the desirable indicators of the quality of control, the desired characteristic polynomial is constructed, and hence the location of the roots of the characteristic equation is determined. Characteristic values of the roots of Latin are called modes, hence the name of the regulator and control - modal.

Formulation of the problem. The following statement of the problem is possible: the choice of control parameters provides for the exact coincidence of the roots of the characteristic equation of a closed system with a predefined set of complex numbers located on the left side (condition of stability) of the complex plane. Such a task is sometimes called the direct task of modal control. In this paper, we describe the following methods for solving other problems of modal regulation, in which the requirement of the exact placement of the roots in the left integrated half-plane is not superimposed, but only their membership in a given domain is required. As noted above, the task of modal control is related to the construction of a regulator, in which the poles of the closed system are located at given points or given areas of the complex plane. The values of such characteristics of a closed system as the transition time, damping, the velocity of transient processes in the regulator, and others are determined by the arrangement of the eigenvalues of the matrix of the closed system in certain areas of the complex plane.

The purpose of the article is to consider the problem of modal control in such areas, which can be described by a system of linear matrix inequalities - these areas will later be called LMI-domains [1,3,4,5]. It can be shown that these areas include vertical and horizontal bands, circles, conical sectors, as well as sections of these areas.

Presenting main material. One of the effective methods for solving problems of modal control synthesis is connected with the use of Lyapunov quadratic functions and the technique of linear matrix inequalities.

The general approach to the modal control synthesis is based on the use of LMI. It turns out that the domains of a certain type on the complex plane in which it is necessary to place the eigenvalues of a matrix of a closed linear system can be described by linear matrix inequalities, that is, as LMI-regions, first recording the necessary inequalities with respect to the variables, and then executing their replacement on some matrices by a special substitution.

In the general case, consider the formal procedure for obtaining linear matrix inequalities that determine the criteria for placing all eigenvalues of the matrix of the control object in the required LMI domain. Note that for numerical solution of the obtained linear matrix inequalities, existing effective algorithms that are implemented in some mathematical packages, in particular MatLab [1.8], can be used.

In the general case, consider the formal procedure for obtaining linear matrix inequalities that determine the criteria for placing all eigenvalues of the matrix of the control object in the required LMI domain. Note that for numerical solution of the obtained linear matrix inequalities, existing effective algorithms that are implemented in some mathematical packages, in particular MatLab [1.8], can be used.

Let's introduce the concept of LMI-area. Let D be some area of the left integrated half-plane. A dynamical system will be called D -stable if all its poles, that is, all the eigenvalues of the matrix, lie in the domain D . In this case, the matrix A will also be called D -stable. In a particular case, when D coincides with the entire left-most complex half-plane, D -stability is reduced to asymptotic stability, which is characterized by the Lyapunov inequality, which is a linear matrix inequality. Namely, the matrix A is asymptotically stable if and only if there exists a symmetric matrix X satisfying the inequalities

$$AX + XA^T < 0, \quad X > 0.$$

Define a class of domains that are characterized in terms of linear matrix inequalities. To do this, we introduce the matrix functions of the complex variable into consideration $z \in C$ (C – a set of complex numbers) that take values in the space of self-connected Hermitian ($m \times m$) – matrices (Hermit Charles, 1822 - 1901)

$$f_D(z) = P + zG + \bar{z}G^T, \quad (1)$$

where $P = P^T \in R^{m \times m}$ and $G \in R^{m \times m}$ – given matrices ($R^{m \times m}$ – set of real matrices of dimension $m \times m$), $\bar{z}$ – combined complex number.

Domain

$$D = \{z \in C : f_D(z) < 0\} \quad (2)$$

called LMI-domain generated by the function $f_D(z)$, which is often called the characteristic function of the domain D .

From this definition it follows that the LMI-domain is a subset of a complex plane that is represented by a linear matrix inequality with respect to variables $x = \text{Re}(z)$ and $y = \text{Im}(z)$. Consequently, the LMI-domain is convex. Also, because of any $z \in D$ takes place $f_D(\bar{z}) = \bar{f}_D(z) < 0$, then the LMI-domain is symmetric with respect to the actual axis.

The most important property of LMI domains is that they are completely determined in terms of linear matrix inequalities with respect to some symmetric positively defined matrix. In order to get these inequalities, we will match the function $f_D(z)$ the next $(m \times m)$ – block matrix

$$M(A, X) = P \otimes X + G \otimes (AX) + G^T \otimes (XA^T), \quad (3)$$

where " $\otimes$ " – the operation of the kronecker product of matrices (Kronecker Leopold, 1823 - 1872).

Recall that the kronecker product matrix is called block matrix, formed by multiplying each element a_{ij} of the matrix A on the matrix B [2]. Given this, note that blocks of the matrix $M(A, X)$ can be written in the form

$$M_{ij}(A, X) = p_{ij}X + g_{ij}AX + g_{ji}XA^T, \quad i, j = 1, 2, \dots, m, \quad (4)$$

where p_{ij} , g_{ij} – the elements of the matrices P and G , respectively.

To construct modal regulators that provide the stability of control objects, it is important to prove Theorem 1 of stability [3,5,7].

Let D –LMI-domain. Then the matrix A is D – stable if and only if there is a matrix $X = X^T$ which satisfies the linear matrix inequalities

$$M(A, X) < 0, \quad X > 0. \quad (5)$$

If the matrix (5) is multiplied left and right on the matrix $E \otimes Y$, where E – unit matrix, $Y = X^{-1}$, then taking into account the properties of the operation of the kronecker product after a series of transformations we obtain the criterion D – stability of the matrix A

$$L(A, Y) = P \otimes Y + G \otimes (YA) + G^T \otimes (A^T Y) < 0, \quad Y = Y^T > 0. \quad (6)$$

On the basis of Theorem 1 one can propose the following algorithm for constructing LMI - domains that determine the D -stability criterion of the system $\dot{x}(t) = Ax(t)$:

1. A characteristic function $f_D(z)$ of the form (1) is constructed so that the set D generated by it has the desired form.

2. Using substitution $(1, z, \bar{z}) \leftrightarrow (X, AX, XA^T)$ the function $f_D(z)$ of the block matrix $M(A, X)$ of the form (3) are brought into conformity.

3. A system of matrix inequalities of the form (5) (or (6)) is formed and is solved with respect to the matrix X (or Y).

4. In accordance with the above theorem 1 we conclude that D is the stability of a multidimensional linear system $\dot{x}(t) = Ax(t)$.

Note one important property of the LMI - domains: LMI - the domains are locked in relation to the intersection operation, that is, the intersection of the LMI - the domains will also be LMI- domain.

Consider some important examples of constructing an LMI domain.

As a first example, consider the set $D_1 = \{z \in C : \operatorname{Re}(z) < -\mu\}$ (Fig.1.a) which corresponds to asymptotically stable systems with a degree of stability no less μ . Obviously, this domain generates a function $f_{D_1}(z) = z + \bar{z} + 2\mu$, and according to Theorem 1, the matrix A is asymptotically stable with a degree of stability not less μ if and only if there is a matrix $X = X^T$, which satisfies the linear matrix inequalities of the form (5)

$$AX + XA^T + 2\mu X < 0, \quad X > 0.$$

Another example of the LMI domain is $D_2 = \{z \in C : |z + q| < r\}$ – inside the circle with a radius r centered at the point $(-q, 0)$ (Fig.1.b). For this domain

$$f_{D_2}(z) = \begin{pmatrix} -r & q + z \\ q + \bar{z} & -r \end{pmatrix} < 0,$$

and the linear matrix inequalities (5) characterizing this region take the form

$$\begin{pmatrix} -rX & qX + AX \\ qX + XA^T & -rX \end{pmatrix} < 0, \quad X > 0.$$

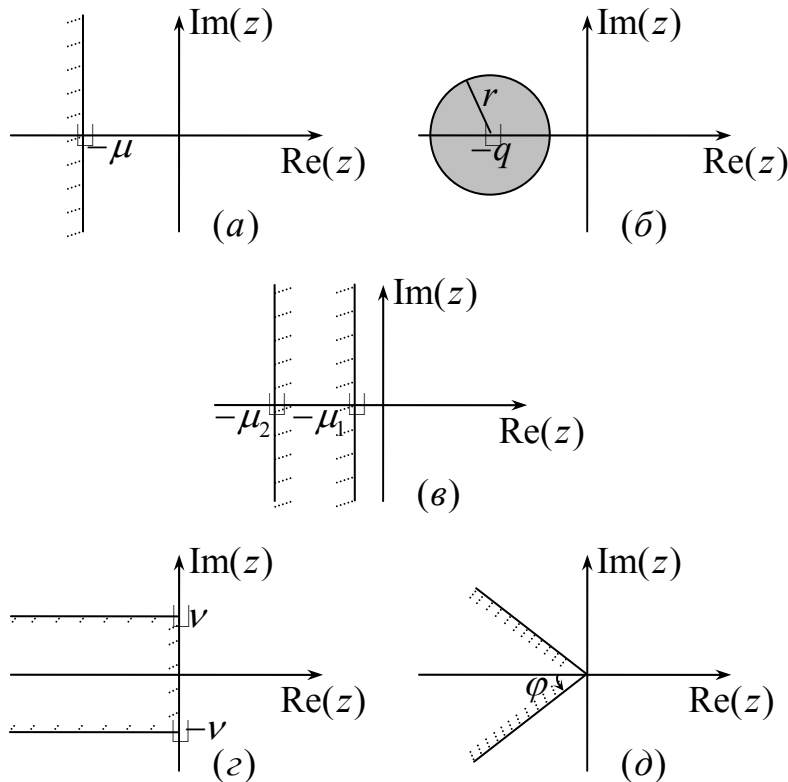


Figure 1 – Examples of LMIs are domains of stability

Vertical strip $D_3 = \{z \in C : -\mu_2 < \operatorname{Re}(z) < -\mu_1\}$ (Fig.1.c) matches the function

$$f_{D_3}(z) = \begin{pmatrix} (z + \bar{z}) + 2\mu_1 & 0 \\ 0 & -(z + \bar{z}) - 2\mu_2 \end{pmatrix}$$

and, respectively, linear matrix inequalities

$$\begin{pmatrix} AX + XA^T + 2\mu_1 X & 0 \\ 0 & -AX - XA^T - 2\mu_2 X \end{pmatrix} < 0, \quad X > 0.$$

Horizontal half-strip $D_4 = \{z \in C : \operatorname{Re}(z) < 0, -\nu < \operatorname{Im} z < \nu\}$ (Fig.1.d) corresponds to the characteristic function

$$f_{D_4}(z) = \begin{pmatrix} -2\nu & z - \bar{z} \\ -(z - \bar{z}) & -2\nu \end{pmatrix}$$

and linear matrix inequalities

$$\begin{pmatrix} -2\nu X & AX - XA^T \\ -AX + XA^T & -2\nu X \end{pmatrix} < 0, \quad X > 0.$$

Finally, to the conic sector $D_5 = \{z \in C : \operatorname{Re}(z) \operatorname{tg} \varphi < |\operatorname{Im} z|\}$ (Fig.1.e) corresponds the function

$$f_{D_5}(z) = \begin{pmatrix} (z + \bar{z}) \sin \varphi & (z - \bar{z}) \cos \varphi \\ -(z - \bar{z}) \cos \varphi & (z + \bar{z}) \sin \varphi \end{pmatrix}$$

and linear matrix inequalities

$$\begin{pmatrix} (AX + XA^T) \sin \varphi & (AX - XA^T) \cos \varphi \\ -(AX - XA^T) \cos \varphi & (AX + XA^T) \sin \varphi \end{pmatrix} < 0, \quad X > 0.$$

Apply now to the apparatus for synthesizing modal control of the linear system for a given LMI- domain. The classical approach to the synthesis of linear feedback (regulators) in the state space is associated with the canonical representation of the controlled object and the construction of a modal control (controller) that provides the given eigenvalues (mods) of the matrix of a closed system. Then the construction of the modal control reduces to the finding of the characteristic polynomial of the matrix A , the choice of the canonical basis, and the solution of the system of linear equations. At the same time, an alternative way of synthesizing stabilizing regulators is possible, based on the application of the theory of linear matrix inequalities and effective algorithms for their solution, implemented, for example, in the MatLab package [6,8].

Let the control object be described by the equation

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t), \quad (7)$$

where $x(t) \in R^n$ – state of the regulator, $u(t) \in R^m$ – control.

The task is to choose the law of management $u(t)$ from the class of linear feedback on the state of the form

$$u(t) = Kx(t), \quad (8)$$

where K – the matrix of the parameters of the regulator corresponding to the order in which the matrix of the closed system (7), (8) will be D -stable, that is, all its eigenvalues of the roots lie in the given LMI- domain.

According to Theorem 1, the problem of D -stability is reduced to the finding of the matrices $X = X^T > 0$ and K , satisfying inequality $M(A+BK, X) < 0$, which is nonlinear in relation to these matrices. However, if you enter the notation $Z = KX$, then the last inequality can be imagined as a linear matrix inequality of the form

$$\begin{aligned} M(A+BK, X) &= P \otimes X + G \otimes ((A+BK)X) + G^T \otimes (X(A+BK)^T) = \\ &= P \otimes X + G \otimes (AX + BZ) + G^T \otimes (AX + BZ)^T = P \otimes X + G \otimes (AX) + G \otimes (BZ) + \\ &+ G^T \otimes (AX)^T + G^T \otimes (BZ)^T = M(A, X) + G \otimes (BZ) + G^T \otimes (BZ)^T < 0 \end{aligned}$$

on unknown matrices K and Z . After these matrices are found, the desired matrix of the parameters of the regulator is like $K = ZX^{-1}$.

Let's consider another approach to the synthesis of D -stabilizing regulators based on the measured output, based on the construction of observers of the state of the object. Let's start with Luenberger's observers in complete order.

For a controlled object

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (9)$$

where $x(t) \in R^n$ – state of the regulator, $u(t) \in R^m$ – control, $y(t) \in R^p$ – the measured output of an object) we choose a regulator in the form of an observer of the state of Luenberger of complete order

$$\begin{cases} \dot{x}_r(t) = Ax_r(t) + Bu(t) + L(Cx_r(t) - y(t)), \\ u(t) = Kx_r(t), \end{cases} \quad (10)$$

where $x_r(t) \in R^n$ – state of the regulator.

It is necessary to define matrices and so that the closed system (9), (10) is D -stable.

We introduce the vector of inconsistency $e(t) = x(t) - x_r(t)$ and as a state of a closed system we choose a vector $(x^T(t), e^T(t))^T$, which satisfies the generalized equation

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x(t) \\ e(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A+BK & -BK \\ 0 & A+LC \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t) \\ e(t) \end{pmatrix}.$$

Obviously, for D - stability of this system, it is necessary and sufficient that the matrices $A+BK$ and $A+LC$ be D - stable. Applying now to the matrix $A+BK$ of Theorem 1, in which the criterion of D -stability is given in the language of linearmatrix inequalities, we arrive at the following form of LMI

$$\begin{aligned} M(A+BK, X_1) &= P \otimes X_1 + G \otimes ((A+BK)X_1) + G^T \otimes (X_1(A+BK)^T) = \\ &= M(A, X_1) + G \otimes (BZ_1) + G^T \otimes (Z_1^T B^T) < 0, \end{aligned} \quad (11)$$

where $Z_1 = KX_1$.

Applying to the matrix criterion D - stability in the form of inequality (6), we obtain another LMI

$$\begin{aligned} L(A+LC, X_2) &= P \otimes X_2 + G \otimes (X_2(A+LC)) + G^T \otimes ((A+LC)^T X_2) = \\ &= L(A, X_2) + G \otimes (Z_2 C) + G^T \otimes (C^T Z_2^T) < 0, \end{aligned} \quad (12)$$

where $Z_2 = X_2 L$.

Thus, we arrive at the necessity of derivation of Theorem 2.

It is necessary and sufficient that the linear matrix inequalities (11) and (12) be solved with respect to the variables in order for the object (9) to be D-stabilized by means of the controller at the output of the form (10) $X_1 = X_1^T > 0$, Z_1 and $X_2 = X_2^T > 0$, Z_2 . In the case of the possibility of solving these inequalities, the parameters of the regulator are as follows

$$K = Z_1 X_1^{-1}, \quad L = X_2^{-1} Z_2.$$

We now synthesize a regulator based on the Luangenberg observer of incomplete order [1,5]. Suppose that in the control object (9) the rank of the matrix C is ($p < n$). Consider an observer

$$\frac{dz(t)}{dt} = Fz(t) + TBu(t) + Qy(t), \quad (13)$$

where $z(t) \in R^l$, $l = n - p$ – observer state, $y(t)$ and $u(t)$ – the measured output and control in the object (9), and the matrices F , T and Q satisfy the matrix equation

$$TA - FT = QC. \quad (14)$$

Re-enter the vector of inconsistency $e(t) = z(t) - Tx(t)$ and note that due to the equations of the object and the observer for him equality is fulfilled

$$\frac{de(t)}{dt} = Fe(t).$$

Thus, if the matrix F is a D -stable, then the vector $z(t)$ asymptotically tracks the vector $Tx(t)$ and in combination with the vector $y(t)$ gives an estimate of the state vector of the object.

To simplify, but not diminishing the generality, we will accept $C = (E_p 0_{p \times n})$, where E_p – unit matrix of dimension p . Note that this can be achieved by replacing the variables accordingly. We break the matrix A and B into blocks

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix},$$

в яких $A_{11} \in R^{p \times p}$, $B_1 \in R^{p \times m}$ – (the orders of other blocks are determined in an obvious manner).

Choose the matrices F , T , and Q , which satisfy the equation (14), in the following way

$$F = A_{22} + LA_{12}, \quad T = \begin{pmatrix} L & E_l \end{pmatrix}, \quad Q = A_{21} + LA_{11} - (A_{22} + LA_{12})L, \quad (15)$$

where the matrix L should be determined from the condition that the matrix F be D -stable.

In accordance with the chosen choice, we introduce the equation of the regulator (control) in the form

$$\frac{dx_r(t)}{dt} = (A_{22} + LA_{12})x_r(t) + (B_2 + LB_1)u(t) + [A_{21} + LA_{11} - (A_{22} + LA_{12})L]y(t),$$

$$u(t) = K_1 x_r(t) + K_2 y(t), \quad (16)$$

where the matrices K_1 and K_2 must be determined from the condition of the D -stability of the closed system (9), (16). Substituting the equation of control into the output system and taking into account that $x_r(t) = Tx(t) + e(t)$, we will get

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = (A + BK)x(t) - BK_1 e(t), \\ \frac{de(t)}{dt} = Fe(t), \end{cases}$$

where $K = (K_2 + K_1 L \quad K_1)$.

Thus, the matrix K is based on the condition that the matrix $A + BK$ is D -stable, and then, taking into account the already found matrix L , the matrices of the regulator K_1 and K_2 are determined. Applying now Theorem 1 and the technique of derivation of Theorem 2, we arrive at the following theorem 3.

In order for an object described by system (9) to be D -stabilized by means of a regulator on the output of the reduced order of form (16), it is necessary and sufficient that the linear matrix inequalities

$$M(A + BK, X_1) = M(A, X_1) + G \otimes (BZ_1) + G^T \otimes (Z_1^T B^T) < 0,$$

$$L(A_{22} + LA_{12}, X_2) = L(A_{22}, X_2) + G \otimes (Z_2 A_{12}) + G^T \otimes (A_{12}^T Z_2^T) < 0$$

were solved with respect to matrix variables $X_1 = X_1^T > 0$, Z_1 and $X_2 = X_2^T > 0$, Z_2 , where the matrix $M(A, X_1)$ and $L(A_{22}, X_2)$ are determined by formulas (3) and (6) respectively. In the case of the possibility of solving these inequalities, the parameters of the regulator are as follows

$$K_1 = H_2, \quad K_2 = H_1 - H_2 L,$$

where $H = (H_1 \quad H_2) = Z_1 X_1^{-1}$, $H_1 \in R^{m \times p}$, $H_2 \in R^{m \times l}$, $L = X_2^{-1} Z_2$.

Conclusion. Thus, the use of the Luenberger observers allows for the synthesis of D -stable regulators for the complete and reduced order of the Luenberger observers on the basis of solving only linear matrix inequalities.

References

1. Баландин Д.В., Коган М.М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. Москва: Физматлит, 2007. 281 с.
2. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. Москва: Физматлит, 2004. 560 с.
3. Поляк Б.Т., Хлебников М.В. Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств. Москва: ЛЕНАНД, 2014. 560 с.
4. Якубович В.А. Решение некоторых матричных неравенств, встречающихся в теории автоматического регулирования. ДАН СССР. 1962. Т. 143, №6. С. 1304-1307.
5. Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. Philadelphia: SIAM, 1994. 193 p.
6. Chilali M., Gahinet P. H^∞ design with pole placement constraints: An LMI approach. IEEE Trans. Automat. Contr., 1996. vol.41, pp. 358-367.
7. Ghaoui L.E., Niculescu S.I. Advances in linear matrix inequality methods in control. Advances in Design and Control. Philadelphia, PA: SIAM, 2000. 372 p.
8. Masubuchi I., Ohara A., Suda N. LMI-based controller synthesis: A unified formulation and solution. Int. J. Robust Nonlinear Contr., 1998, vol. 8, pp. 669-686.

References

1. Balandin, D.V., Kogan, M.M. (2007). Sintez zakonov upravlenija na osnove linejnyh matrichnyh neravenstv [Synthesis of control laws based on linear matrix inequalities]. Moscow: Fizmatlit [in Russian].
2. Gantmaher, F.R. (2004). Teorija matric [Matrix Theory]. Moscow: Fizmatlit [in Russian].
3. Poljak, B.T., Hlebnikov, M.V. (2014). Upravlenie linejnymi sistemami pri vneshnih vozmushhenijah: Tehnika linejnyh matrichnyh neravenstv [Control of linear systems under external disturbances: Technique of linear matrix inequalities]. Moscow: LENAND [in Russian].
4. Jakubovich, V.A. (1962). Reshenie nekotoryh matrichnyh neravenstv, vstrechajushhhsja v teorii avtomaticheskogo regulirovanija [The solution of some matrix inequalities encountered in the theory of automatic regulation]. *DAN SSSR, Vol.143, 6*, 1304-1307 [in Russian].
5. Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E., Balakrishnan, V. (1994). Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. Philadelphia: SIAM [in English].
6. Chilali, M., Gahinet, P. (1996). H^∞ design with pole placement constraints: An LMI approach. *IEEE Trans. Automat. Contr., Vol.41*, 358–367 [in English].
7. Ghaoui, L.E., Niculescu, S.I. (2000). Advances in linear matrix inequality methods in control. Advances in Design and Control. Philadelphia, PA: SIAM [in English].
8. Masubuchi, I., Ohara, A., Suda, N. (1998). LMI-based controller synthesis: A unified formulation and solution. *Int. J. Robust Nonlinear Contr, Vol. 8*, 669–686. [in English].

А.П. Лобок, канд. фіз.-мат. наук, **Б.Н. Гончаренко**, проф., д-р техн. наук

Національний університет харчових технологій, Київ, Україна

Л.Г. Віхрова, проф., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

М.А. Сич, канд. техн. наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна

Синтез модального керування багатовимірними лінійними системами в сільськогосподарському виробництві на основі лінійних матричних нерівностей

Дається розв'язок задачі побудови модальних регуляторів для лінійних багатовимірних систем в сільськогосподарському виробництві, що забезпечують D -стійкість (асимптотичну стійкість) об'єкта керування. Керування представлено у вигляді регуляторів, що забезпечують зворотний зв'язок за виходом об'єкта керування, і використовує спостерігачі Луенбергера повного і зниженого порядку. Для обчислення матриць регуляторів використовується техніка лінійних матричних нерівностей і узагальнення поняття стійкості за Ляпуновим (D - стійкість). Наведені теореми, що дають необхідні і достатні умови D - стійкості керованої системи.

В роботі дається конструктивний розв'язок задачі синтезу D - стабілізуювальних (модальних) регуляторів за вимірюваним виходом об'єкта керування, заснований на побудові спостерігачів стану об'єкта певного порядку. Розв'язок отримано на основі використання теорії лінійних матричних нерівностей (LMI). Для чисельного моделювання отриманих модальних регуляторів можна використовувати ефективні методи опуклої оптимізації і відповідне програмне забезпечення, яке входить до ряду пакетів прикладних програм, зокрема, в систему MatLab.

Описуються методи розв'язання не тільки прямої задачі модального керування, коли вибором параметрів регулятора забезпечується збіг коренів характеристичного рівняння замкненої системи з попередньо заданим набором комплексних чисел, розташованих в лівій частині комплексної площини, але інших задач модального регулювання, в яких вимога точного розміщення коренів в лівій комплексної півплощині вже не накладається, а потрібна лише їх приналежність до деяких заданих областей. Такі області, описані системою лінійних матричних нерівностей, називаються LMI- областями. **динамічна система, модальне керування, регулятори, D -стійкість, спостерігачі Луенбергера, лінійні матричні нерівності, кронекеровий добуток матриць**

Одержано (Received) 11.12.2018

Прорецензовано (Reviewed) 14.12.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 681.17; 681.5.015

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.79-88>**Ю.М. Пархоменко**, доц., канд. техн. наук, **М.Д. Пархоменко**, **А.Р. Бокій***Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна**e-mail: parhomenkoym@ukr.net*

Аналіз можливостей датчиків об'ємної дії, що застосовуються в діючих системах контролю висіву

Проводиться аналіз технічних можливостей ємнісних і оптичних датчиків об'ємної дії, які застосовуються в діючих системах контролю висіву. Виконано ряд експериментальних і теоретичних досліджень для визначення можливостей використання датчиків об'ємної дії для ресстрації зернового потоку, що формується різними типами висівних апаратів сівалок. Доводиться, що подальша модернізація існуючих типів ємнісного та оптичного, видимої частини спектру, датчиків, як найбільш простих за конструкцією та технологією виготовлення, з метою використання їх для ідентифікації зернового потоку недоцільна і безперспективна.

контроль висіву, ємнісний датчик, оптичний датчик, зерновий потік, імпульс, площа контролю**Ю.М. Пархоменко**, доц., канд. техн. наук, **М.Д. Пархоменко**, **А.Р. Бокій***Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна*

Анализ возможностей датчиков объемного действия, что используются в действующих системах контроля высева

Проводится анализ технических возможностей емкостных и оптических датчиков объемного действия, которые применяются в действующих системах контроля высева. Выполнен ряд экспериментальных и теоретических исследований для определения возможностей использования датчиков объемного действия для регистрации зернового потока, который формируется различными типами высевающих аппаратов сеялок. Доказывается, что дальнейшая модернизация существующих типов емкостного и оптического, видимой части спектра, датчиков, как наиболее простых по конструкции и технологии изготовления, с целью использования их для идентификации зернового потока нецелесообразна и бесперспективна.

контроль высева, емкостной датчик, оптический датчик, зерновой поток, импульс, плоскость контроля

Постановка проблеми. Зерновий сектор України є стратегічною галуззю економіки держави а збільшення обсягів ВВП в аграрному секторі забезпечує вдвічі більший ефект порівняно з іншими сферами господарства. Україна увійшла в елітарну групу провідних експортерів зерна на світовому ринку (щорічний експорт у 60...80 країн світу, обсяги експорту – від 7 до 18 млн. т.) [1]. Відомо, що сімба є одним з основних технологічних процесів в рослинництві, яка вагомо впливає на врожайність посівних культур. Значним фактором підвищення продуктивності і якості сівби є впровадження автоматизованих систем контролю висіву, тому питання їх подальшого вдосконалення завжди є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд зернових сівалок точного, суцільного та рядкового посіву представлених вітчизняними і зарубіжними виробниками на Міжнародній агропромисловій виставці «AGROEXPO-2017» у м. Кропивницькому показав, що практично усі вони оснащені сучасними системами контролю висіву (СКВ). Необхідність обладнання сівалок цифровими системами

контролю висіву сьогодні уже не потребує обґрунтування. Представлені на виставці вітчизняні СКВ такі як: «RECORD» (розроблена відділом досліджень та розвитку компанії «Трак», Україна, м. Херсон) [2], «MONADA» (ООО НПФ Монада, Україна, м. Херсон) [3], «ФАКТ» (ЧП «Руденко», Україна, м. Полтава) [4] комплектуються, з однієї сторони, бортовими системами збирання, обробки та відображення інформації, а з іншої – комплексом датчиків призначених для реєстрації параметрів процесу висіву і придатних для встановлення на різні типи вітчизняних та зарубіжних сівалок.

Постановка завдання. Незважаючи на різнобічність апаратної реалізації бортових систем СКВ (різні типи мікроконтролерів, елементів спряження, відображення інформації тощо) і прив'язаного до неї програмного забезпечення, в цілому вони надають механізатору майже однотипну інформацію про: проходження насіння по висівним патрубкам; зменшення інтенсивності зернового потоку для суцільного висіву; забивання або відсутність висіву в патрубку із зазначенням його номера; кількість "двійників" (в %), "пропусків" (в %), норму висіву (в шт./п.м.) для сівалок точного висіву; рівень насіння і добрив у бункерах; швидкість руху сівалки (км/год); пройдений шлях (км); засіяну площу (га) тощо. Функціональні можливості бортової системи можна безперервно вдосконалювати, шляхом внесення змін в програмне забезпечення або реалізації на більш потужних мікроконтролерах. В недалекому майбутньому бортову систему замінить багатофункціональний бортовий комп'ютер.

Особливо проблемними компонентами в СКВ є датчики – реєстратори зернин в потоці. Темпи їх вдосконалення є більш тривалими, а шляхи – складнішими. На сьогодні в СКВ найбільше використання мають два типи датчиків зернового потоку – ємнісні і оптичні. За своєю фізичною природою ємнісні датчики є пристроями об'ємної дії – реагують на зміну діелектричної проникності пролітаючими між обкладинками конденсатора зернинами. В діючих СКВ використовуються і оптичні датчики об'ємної дії, які реагують на зміну інтенсивності світлового потоку на вході фотоприймача при перетині насінинами площини контролю.

Виклад основного матеріалу. Для визначення можливостей використання датчиків об'ємної дії для реєстрації зернового потоку, що формується різними типами висівних апаратів сівалок, було проведено ряд експериментальних і теоретичних досліджень. Дослідження функціональних можливостей ємнісного датчика висіву СКС «Нива 23» [5] виконувалися за допомогою лабораторної установки, представленої на рис.1.

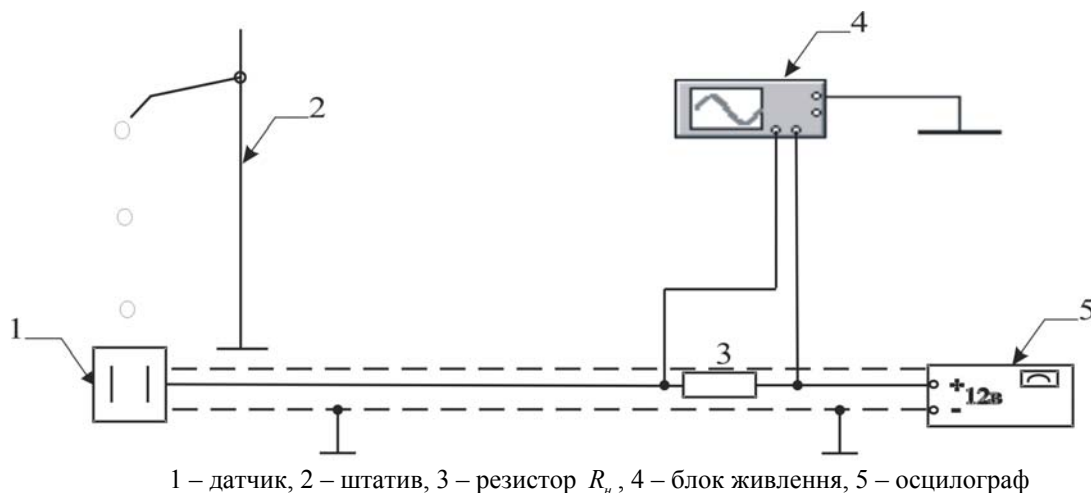


Рисунок 1 – Установка для дослідження датчика об'ємної дії

Джерело: розроблено автором

В якості об'єктів контролю було обрано насіння кукурудзи, яке давало найбільшу амплітуду імпульсу реєстрації. Задана швидкість руху насіння в площині контролю датчика визначалася висотою його скидання за допомогою штатива 2. При перетині насінням площини контролю датчика 1 на його виході формувалися імпульси, амплітуда і форма яких, виділена за допомогою навантажувального резистора 3 ($R_n = 750 \text{ ом}$), реєструвалася цифровим осцилографом 4 типу HPS5 та фотокамерою.

Живлення для датчика напругою $U = \pm 12 \text{ в}$ подавалося від джерела постійного струму 5 типу В5-50. Результати досліджень, у формі осцилограм, представлені на рис. 2, а параметри сигналів, сформованих при перетині площини датчика однією та двома зернинами, – табл.1 та 2.

Таблиця 1 – Параметри сигналів при скиданні однієї насінини

№ досліду	1	2	3	4
Висота скидання H , см	2	10	20	40
Швидкість насіння V_z , м/с	0,63	1,4	1,98	2,8
Амплітуда імпульсу U_c , мВ	103	140	149	159
Тривалість імпульсу τ_c , мс	24	16	12	8

Джерело: розроблено автором

Аналіз сигналів (табл. 1) показує, що при збільшенні швидкості руху насіння V_z тривалість імпульсів реєстрації τ_c зменшується, а амплітуда U_c – незначним чином збільшується. Остання залежить також від положення насінини в момент перетину нею площини контролю.

Таблиця 2 – Параметри сигналів при скиданні двох насінин

№ досліду	5	6	7	8
Розміщення насінин вздовж напрямку руху	Паралельно або перекриваються	Відстань 3 ÷ 5 мм	Відстань 10 ÷ 20 мм	Відстань 30 ÷ 40 мм
Висота скидання першої насінини $H = 10 \text{ см}$				
Швидкість насіння V_z , м/с	1,4 ÷ 1,43	1,4 ÷ 1,47	1,4 ÷ 1,53	1,4 ÷ 1,66
Амплітуда імпульсу U_c , мВ	210	127	141	155
Тривалість імпульсу τ_c , мс	16 ÷ 20	26	16/12	16/22

Джерело: розроблено автором

При паралельному перетині двома насінинами площини контролю датчика (дослід №5) амплітуда сигналу збільшується майже вдвічі (табл. 2.3), залежно від їх положення, а тривалість імпульсу така ж, як і при перетині однієї насінини. Якщо дві насінини, при перетині площини реєстрації, частково перекривають одна одну, то

амплітуда імпульсу може зменшитися до рівня однієї насінини, а тривалість – збільшиться. В такому випадку складно знайти критерій для реєстрації двох насінин.

Коли насінини летять одна услід другій і відстань між їх кромками не перевищує 10 мм (дослід №6), то імпульс датчика роздвоюється і приймає форму двох горбів. Амплітуда сигналу така ж, як і від однієї насінини, а тривалість імпульсу збільшується майже вдвічі. Аналогічна форма сигналу може бути і від однієї насінини, коли вона ударяється об стінку датчика (див. дослід №8).

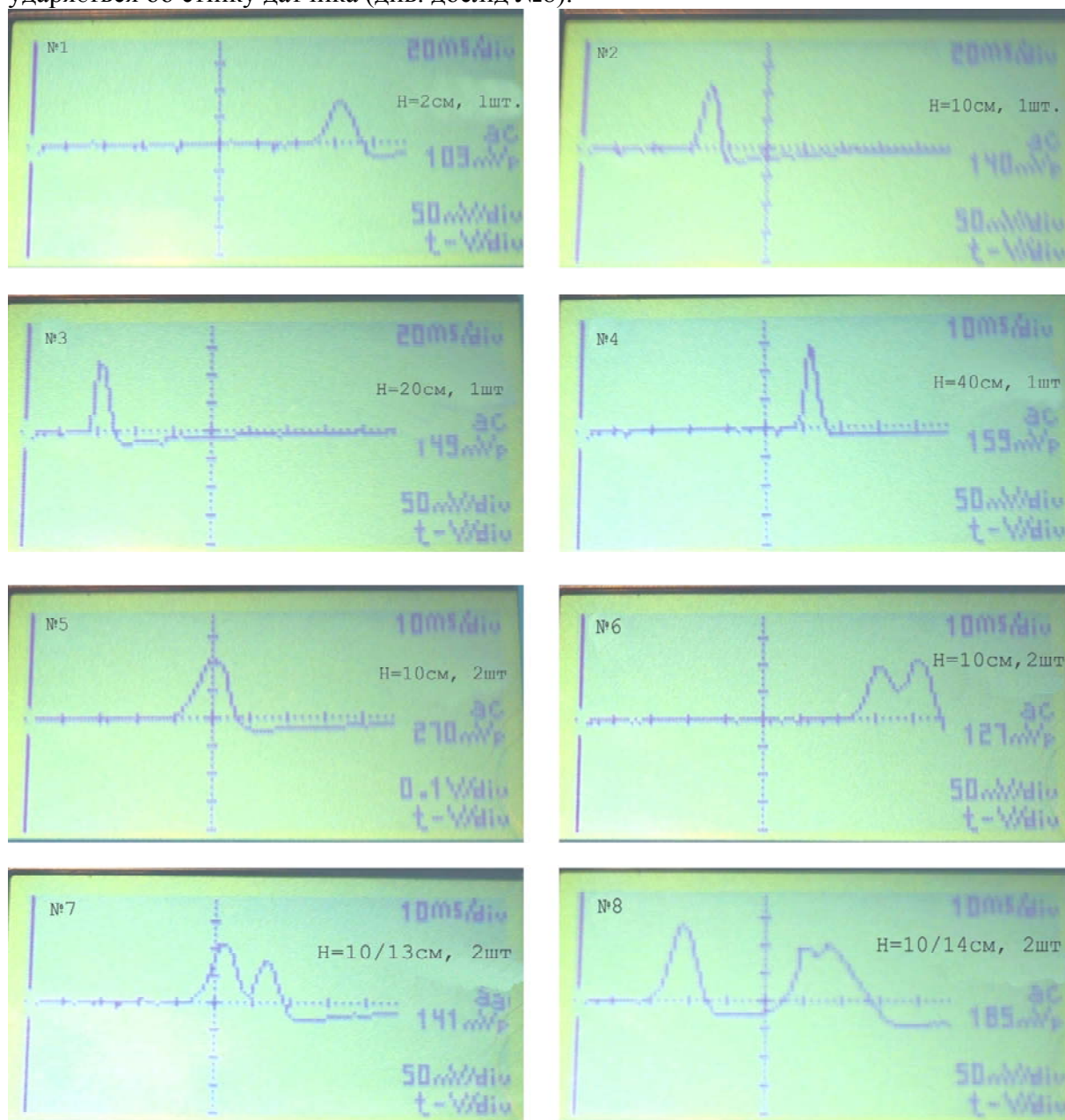


Рисунок 2 – Осцилограми дослідження функціональних можливостей смісного датчика
Джерело: розроблено автором

Введення порогу спрацювання для виділення двох сигналів ускладнюється тим, що амплітуди сигналів залежать також і від швидкості руху насіння та його положення в площині контролю. Тобто, при появі такого сигналу виділити двійники дуже складно.

Розглянутий випадок вказує також на те, що визначена вище висота зони чутливості ємнісного датчика $h_k = 8 \text{ мм}$ є заниженою, її можна приймати на рівні $h_k = 9 \div 10 \text{ мм}$, що збільшує розрахунковий діапазон тривалості імпульсів реєстрації.

Коли насінини летять одна услід другій і відстань між їх кромками перевищує $20 \div 30 \text{ мм}$ (дослід №7) або більше (дослід №8), то формуються два незалежних імпульси із своєю амплітудою і тривалістю. При цьому кожна насінина реєструється як окремий одиничний об'єкт.

Для оптичного датчика найкращі результати отримані при використанні лінійного випромінювача, що представляє собою групу мініатюрних ламп накаливання або світлодіодів по усій ширині контрольованого поля з щільною діафрагмою в $1\text{-}2 \text{ мм}$ та лінійного фотоприймача у вигляді $4\text{-}6$ фоторезисторів, які перекривають фоточутливим шаром контрольоване поле по усій ширині без зазорів і включаються до вимірювального ланцюга за мостовою схемою. Результати випробувань оптичного датчика об'ємної дії показали, що процес і характер формування вихідних сигналів у нього подібний до ємнісного. Єдине, що при меншій висоті зони чутливості оптичний датчик має більш високу дозвільну здатність при реєстрації зерен-двійників які рухаються один услід другому.

Використання зернин кукурудзи дало можливість більш наочно дослідити процес формування вихідних сигналів датчика, оскільки при прольоті зернин пшениці, буряку тощо ці сигнали мають меншу амплітуду, форму і тривалість. Проведені дослідження показали, що амплітуда, форма і тривалість вихідних сигналів залежать від швидкості руху об'єктів, їх діелектричної проникності (для ємнісних датчиків), площі проекції зображення (для оптичних датчиків), положення і кількості об'єктів в площині контролю, відстані між об'єктами вздовж осі падіння. Датчики об'ємної дії надійно реєструють поодинокі об'єкти. Якщо ж зону чутливості датчика одночасно перетинають декілька дискретних об'єктів, то формується вихідний сигнал з якого не можна виділити ці об'єкти. В цьому випадку група об'єктів фіксується як один об'єкт. Гарантовано розпізнаються лише зерна двійники, відстань між якими вздовж напрямку падіння перевищує висоту зони чутливості датчика, яка і визначає його дозвільну здатність.

Дослідимо можливості використання ємнісного та оптичного датчиків об'ємної дії в системі контролю висіву зернової сівалки типу СЗ-3.6 у якій формується найбільше складний для реєстрації потік дискретних об'єктів. Для цього визначимо спершу терміни реєстрації кожної окремої насінини зернового потоку ємнісним та оптичним датчиками. Якщо геометричні розміри насіння не перевищують висоти зони чутливості ємнісного датчика h_k , то тривалість імпульсу реєстрації насінини Δt_1 , що перетинає об'ємну площину контролю, залежить від швидкості її руху V_z і висоти зони чутливості конденсатора h_k - $\Delta t_1(h_k, V_z) = h_k / V_k$, в іншому випадку – на тривалість імпульсу буде впливати довжина проекції зернини h_z вздовж напрямку її падіння - $\Delta t_1(h_z, V_z) = h_z / V_k$. Висота пластин плоского конденсатора ємнісного датчика, що використовується в СКС «Нива 23» [5], вздовж напрямку руху насіння дорівнює $h_k = 5 \text{ мм}$. Так як пластини розташовані на відстані $d_k = 3 \cdot h_k = 15 \text{ мм}$ одна від одної, то напруженість електричного поля виходить за межі однорідного поля, тому висоту зони чутливості конденсатора h_k можна прийняти на рівні $h_k = 8 \text{ мм}$. Геометричні розміри насіння пшениці коливаються в межах $1,4 \div 8,6 \text{ мм}$ [6] і є близькими до висоти зони чутливості ємнісного датчика h_k .

Тривалість імпульсу реєстрації зернини оптичним датчиком Δt_2 , який працює за принципом реєстрації сумарного світлового потоку, що формується в площині фотоприймача при перетині нею зони контролю, залежить від довжини проекції насінини на вісь падіння h_z , перпендикулярну площині контролю датчика та швидкості її руху – $\Delta t_2(h_z, V_z) = h_z / V_k$.

На рис. 3 представлено графіки залежності терміну реєстрації (тривалість імпульсу) насіння в потоці від швидкості його руху у ємнісного датчика $\Delta t_1(0.008, V_z) = h_k / V_k$ при висоті зони чутливості $h_k = 8 \text{ мм}$ та у оптичного датчика $\Delta t_2(h_z, V_z) = h_z / V_k$ при довжині проекції насіння на вісь падіння $h_z = 2 \text{ і } 9 \text{ мм}$.

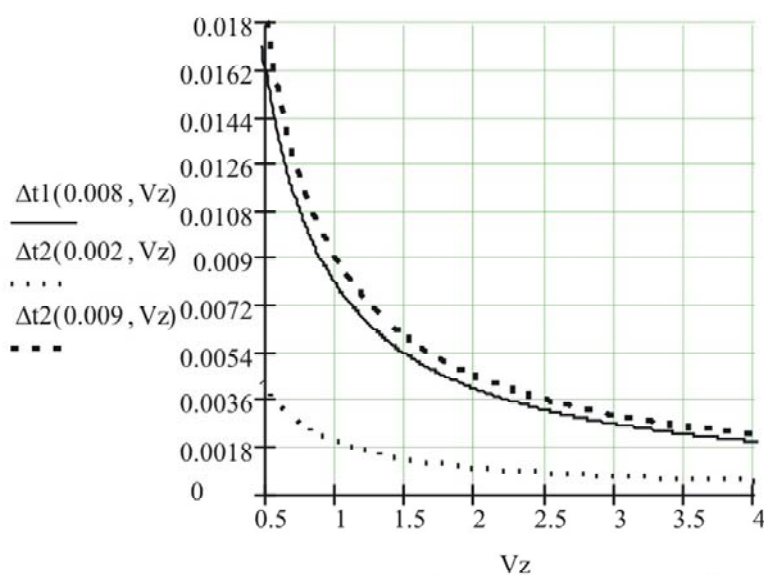


Рисунок 3 – Залежність часу виміру $\Delta t, \text{с}$ від швидкості руху насіння $V_z, \text{м/с}$

Джерело: розроблено автором

Аналіз графіків показує, що при швидкості руху насіння $V_z = 0,5 \div 0,9 \text{ м/с}$ на відстані $2 \div 5 \text{ см}$ від денця висівного апарата тривалість імпульсів реєстрації у ємнісного датчика коливається в межах $\Delta t_1(V_z) = 0,009 \div 0,016 \text{ с}$, а у оптичного – для малих фракцій насіння ($h_z = 2 \text{ мм}$) в межах $\Delta t_2(V_z) = 0,002 \div 0,004 \text{ с}$, а для великих ($h_z = 9 \text{ мм}$) в межах $\Delta t_2(V_z) = 0,009 \div 0,018 \text{ с}$ [7]. Ближче до дна борозни при швидкості насіння $V_z = 2 \div 4,6 \text{ м/с}$ [8] тривалість імпульсів реєстрації у ємнісного датчика коливається в межах $\Delta t_1(V_z) = 0,002 \div 0,004 \text{ с}$, а у оптичного – для малих фракцій насіння ($h_z = 2 \text{ мм}$) в межах $\Delta t_2(V_z) = 0,0005 \div 0,001 \text{ с}$, а для великих ($h_z = 9 \text{ мм}$) в межах $\Delta t_2(V_z) = 0,0023 \div 0,0045 \text{ с}$.

Згідно з агротехнічними вимогами [6, 9, 10] для кожного виду зернової культури встановлена своя норма висіву Q , яка є базовим показником, залежним від регіону, якості ґрунту, сорту насіння, тощо:

$$Q_c = 10^2 \cdot Q \cdot b \cdot V_c / (3,6 \cdot A) \text{ (шт/с)}, \quad (1)$$

де Q_c – щільність зернового потоку на виході сошника в шт/с при заданій нормі висіву Q (кг/га);

b – ширина міжряддя, м;

A – вага 1000шт. насіння, грам;

V_c – швидкість руху сівалки, км/год.

Середньостатистична кількість зернин пшениці (фракція $A = 30g/1000шт$) [6] яка за заданий інтервал часу Δt (с) може перетинати площину поперечного перерізу при різних швидкостях руху сівалки V_c (км/год) та максимальній нормі висіву $Q_{max} = 250$ кг/га визначається на підставі співвідношення (2) за виразом

$$f_{cp}(V_c, \Delta t) = Q_c \cdot \Delta t = 10^2 \cdot Q \cdot b \cdot V_c \cdot \Delta t / (3,6 \cdot A) (шт / \Delta t), \quad (2)$$

де $f_{cp}(V_c, \Delta t)$ – середнє значення щільності зернового потоку $f_{cp}(V_c, \Delta t)$ в інтервалі часу Δt .

Таблиця 3 – Середні значення щільності $f_{cp}(V_c, \Delta t)$ в інтервалі Δt (с) при різних V_c (км/год)

Інтервал виміру Δt (с)	Швидкість руху сівалки V_c (км/год)						
	4,6	5,9	7,2	8,5	9,8	11,1	12,4
0,002	0.32	0.41	0.5	0.6	0.68	0.77	0.86
0,004	0.64	0.82	1.0	1.18	1.36	1.54	1.72
0,01	1.6	2.05	2.5	3	3.4	3.85	4.31
0,02	3.2	4.1	5	5.9	6.8	7.7	8.6

Джерело розроблено автором

Занесені до табл. 3 результати розрахунків щільності зернового потоку $f_{cp}(V_c, \Delta t)$ (шт) в інтервалі Δt (с) при різних швидкостях руху сівалки V_c (км/год) слугують підставою для оцінки дозволяючої здатності датчиків. При швидкостях руху насіння $V_z = 0,5 \div 0,9$ м/с на виході висівного апарату кількість одночасно пролітаючих насінин за термін реєстрації однієї ($\Delta t = 0,01 \dots 0,02$ с) коливається в діапазоні 1,6...8,6шт, а при швидкостях насінин $V_z = 2 \div 4,6$ м/с на виході насіннепроводу кількість одночасно пролітаючих насінин за термін реєстрації однієї ($\Delta t = 0,002 \dots 0,004$ с) коливається в діапазоні 0,36...1,72шт [7].

Визначимо можливість використання ємнісного та оптичного датчиків об'ємної дії для реєстрації зернового потоку на виході висівного апарата та на рівні дна борозни сівалки СЗ-3,6.

Аналіз результатів дослідження зернового потоку сформованого катушковим висівним апаратом показав, що датчик, призначений для роботи в системах комп'ютерної ідентифікації, повинен реєструвати до 350÷400 насінин в секунду, середньостатистичний інтервал між якими, при максимальній нормі висіву $Q = 250$ кг/га та швидкості руху сівалки $V_c = 4,6 \div 12,4$ км/год, змінюється в діапазоні $T_\delta = 0,0023 \div 0,0063$ с, а щільність потоку в заданих інтервалах виміру відповідає встановленим в табл. 3 параметрам.

Оскільки тривалість імпульсів реєстрації при швидкості руху насіння $V_z = 0,5 \div 0,9$ м/с у ємнісного датчика коливається в межах $\Delta t_1(V_z) = 0,009 \div 0,016$ с, а

у оптичного, для малих фракцій насіння ($h_z = 2 \text{ мм}$) - в межах $\Delta t_2(V_z) = 0,002 \div 0,004 \text{ с}$, а для великих ($h_z = 9 \text{ мм}$) - в межах $\Delta t_2(V_z) = 0,009 \div 0,018 \text{ с}$, то перший може реєструвати на виході висівного апарата до $63 \div 111$ насінин в секунду, а другий – відповідно до $250 \div 500$ шт/с та до $56 \div 111$ шт/с. Максимальні значення щільності потоку насіння (див. табл. 3) при заданих інтервалах виміру оптичного датчика $\Delta t_2(V_z) = 0,002 \div 0,004 \text{ с}$ та $\Delta t_2(V_z) = 0,009 \div 0,018 \text{ с}$ коливаються в межах $0,36 \dots 1,72 \text{ шт}$ і $1,6 \dots 8,6 \text{ шт}$, а для ємнісного, при $\Delta t_1(V_z) = 0,009 \div 0,016 \text{ с}$ - в межах $1,6 \dots 8,6 \text{ шт}$ [7]. Тобто, за своїми функціональними можливостями ні ємнісний, ні оптичний датчики об'ємної дії використовувати для реєстрації насіння в потоці на виході котушкового висівного апарата не можливо.

Так як тривалість імпульсів реєстрації при швидкості руху насіння $V_z = 2 \div 4,6 \text{ м/с}$ у ємнісного датчика коливається в межах $\Delta t_1(V_z) = 0,002 \div 0,004 \text{ с}$, а у оптичного, для великих фракцій ($h_z = 9 \text{ мм}$), - в межах $\Delta t_2(V_z) = 0,0023 \div 0,0045 \text{ с}$, то перший може реєструвати на рівні дна борозни до $250 \div 500$ насінин в секунду, а другий – до $222 \div 444$ шт/с. Оскільки на рівні дна борозни зерновий потік вважається рівномірним, то в якості бази порівняння приймаємо середні значення щільності в заданому інтервалі виміру (див. табл. 3). Середні значення щільності потоку насіння при заданих інтервалах виміру оптичного і ємнісного датчиків при $\Delta t(V_z) = 0,002 \div 0,004 \text{ с}$ знаходяться в межах $0,36 \dots 1,72 \text{ шт}$. Тобто, на виході сошника оптичний датчик об'ємної дії можна використовувати лише для реєстрації малих фракцій насіння ($h_z \leq 2 \text{ мм}$), а оптичний датчик для великих фракцій і ємнісний датчик для усіх типів фракцій, за своїми функціональними можливостями, взагалі не придатні для реєстрації такого зернового потоку, так як вони не здатні реєструвати насіння-двійники, що летять паралельно.

Оскільки кількість зерен – двійників в потоці просапних культур на виході апаратів сівалки точного висіву досягає $12\text{-}20\%$ [4, 5], то і параметри цього потоку подібні до зернового на виході сошника сівалки СЗ-3,6, тому похибка реєстрації в $1\text{-}2\%$ в діючих системах контролю висіву оснащених датчиками об'ємної дії не може бути достовірною.

Висновки. Таким чином приходимо до висновку, що подальша модернізація існуючих типів ємнісного та оптичного, видимої частини спектру, датчиків, як найбільш простих за конструкцією та технологією виготовлення, з метою використання їх для ідентифікації зернового потоку недоцільна і безперспективна. Необхідно розробляти датчики іншого типу, які б забезпечували реєстрацію до 2-3 паралельно пролітаючих зернин в площині його контролю.

Список літератури

1. Руда О.Л. Зерновий ринок України //XIV Міжнародна наукова інтернет - конференція «Сучасний соціокультурний простір 2017». Вінницький державний аграрний університет.
2. Система контролю высеву RECORD. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Херсон: ТОВ «ТРАК», 2016. 27 с. URL: <http://seeding.com.ua>
3. Система контролю высеву MONADA.. Документация, паспорта, инструкции, программное обеспечение. НПФ «МОНАДА.», г. Херсон. URL: <http://www.monada.ks.ua>.
4. Руденко В.П. Полтавская технология посева. Пособие для агрономов, инженеров с/х производства, конструкторов. – Полтава: ООО «Копи-Центр», 2013, 54с.
5. Система контролю высеву «НИВА 23». Техническое описание и инструкция по эксплуатации., г. Полтава, 2002г. 42с
6. Сисолін П. В. Теорія проектування та розрахунки посівних машин: Навч. Посібник, Київ.: ІСДО,

1994. – 148 с.
7. Пархоменко Ю.М. Визначення математичної моделі процесу формування зернового потоку на виході котушкового висівного апарата / Ю.М. Пархоменко, В.О. Кондратець, М.Д. Пархоменко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвідомч. наук.- техн. зб.-к. – Кіровоград: КНТУ, 2011. Вип.№41. С. 62-68.
8. Ю.М. Пархоменко, В.О. Кондратець, М.Д. Пархоменко. Визначення математичної моделі розрахунку коефіцієнту опору повітря та критичної швидкості зерна при його транспортуванні висівним апаратом. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КНТУ*. Кіровоград, 2008. Вип.№21. С105-109.
9. Машины посівні. Випробування сільськогосподарської техніки. Методи випробувань: СОУ 74.3-37-129: 2004. - [Чинний від 2006-08-01]. Київ: Мінагрополітики України, 2006. – 86 с. – (Стандарт Мінагрополітики України).
10. Агротехнические требования на сельскохозяйственные машины: Сб. Госкомсельхозтехника СССР. Москва: ЦНИИТЕИ, 1983. Т. 32. 342с.

References

1. Ruda, O.L. Zernoviy rinok Ukraini [Grain market of Ukraine]. Modern Socio-Cultural Space 2017: *XIV Mizhnarodna naukova Interenet-konferentsiya – 14th International Scientific Internet Conference*. Vinnitskiy derzhavniy agrarniy universitet [in Ukrainian].
2. Sistema kontrolya vyiseva RECORD [Record seeding control system]. (2016). Herson: TOV «TRAK». *seeding.com.ua*. Retrieved from <http://seeding.com.ua> [in Russian].
3. Sistema kontrolya vyiseva MONADA [MONADA seeding control system]. Herson. *monada.ks.ua*. Retrieved from <http://www.monada.ks.ua>. [in Russian].
4. Rudenko, V.P. (2013). Poltavskaya tehnologiya poseva. [Poltava seeding technology]. Poltava: ООО «Kopi-Tsentr» [in Russian].
5. Sistema kontrolya vyiseva «NIVA 23» [NIVA 23 seeding control system]. (2002). Poltava [in Russian].
6. SisolIn, P. V. (1994). Teoriya proektuvannya ta rozrahunki posivnih mashin: [The theory of designing and calculating seeding machines]. Kyiv: ISDO [in Ukrainian].
7. Parhomenko, Yu.M., Kondratets, V.O., Parhomenko, M.D. (2011). Vznachennya matematichnoyi modeli protsesu formuvannya zernovogo potoku na vihodi kotushkovogo visivnogo aparata [Determination of the mathematical model of the process of formation of grain flow at the output of the coil seeding machine]. *Konstruyuvannya, virobnitstvo ta ekspluatatsiya silskogospodarskikh mashin. Zagalnodерж. mizhvidomch. nauk.- tehn. zb-k, Vol.41*, 62-68. [in Ukrainian]
8. Parhomenko, Yu.M., Kondratets, V.O., Parhomenko, M.D. (2008) Vznachennya matematichnoyi modeli rozrahunku koeffitsientu oporu povitrya ta kritichnoyi shvidkosti zerna pri yogo transportuvanni visivnim aparatom [Determination of the mathematical model of the calculation of the air resistance coefficient and the critical grain velocity when transported by seeding machine]. *Tehnika v silskogospodarskomu virobnitstvi, galuzeve mashinobuduvannya, avtomatizatsiya. Zbirnik nauk. prats KNTU, Vol.21*, 105-109 [in Ukrainian].
9. Mashini posivni. [Seeding mashines]. (2006). Viprobuвання silskogospodarskoyi tehniki. Metodi viprobuвання. *SOU 74.3-37-129: 2004 from 01 August 2006*. Kyiv: Minagropolitiki Ukraini (Standart Minagropolitiki Ukraini) [in Ukrainian].
10. Agrotehnicheskie trebovaniya na selskohozyaystvennyie mashiny [Agrotechnical requirements for agricultural machinery]. (1983). *Sb. Goskomselhoztehnika SSSR*. Moscow: TsNIITEI, Vol. 32, 342 [in Russian].

Yuri Parhomenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mikhail Parhomenko**, **A.Bokiy**

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analysis of the Capabilities of Volumetric Sensors that are Used in Existing Seeding Monitoring Systems

The analysis of the technical capabilities of capacitive and optical sensors of volumetric action, which are used in existing seeding monitoring systems, is carried out. A number of experimental and theoretical studies have been carried out to determine the possibilities of using sensors of volumetric action to register the grain flow, which is formed by various types of seeders.

A number of experimental and theoretical studies were carried out to determine the possibilities of using volumetric sensors for registration of grain flow formed by different types of seeding machines of seeders. Investigation of the functional capabilities of the capacitive sowing sensor SCS "Niva 23" was carried out with

the help of a laboratory installation.

Corn seeds were selected as objects of control, which gave the largest amplitude of the pulse of registration. The set speed of the seed in the plane of control of the sensor was determined by the height of its reset. When crossing the seed of the control plane of the sensor at its output, impulses were formed, the amplitude and shape of which, separated by a load resistor, was recorded by a digital oscilloscope of type HPS5 and a camera.

The possibility of using capacitive and optical volumetric sensors for registration of grain flow at the output of the seeding machine and at the level of the bottom of the furrow of the drill machine SZ-3,6 was determined.

The analysis of the results of the study of the grain flow formed by the coil sowing machine showed that the sensor intended for work in computer identification systems should register up to $350 \div 400$ seeds per second, the average interval between which changes in range $T_p = 0,0023 \div 0,0063s$.

As a result of the received experimental data, we conclude that further upgrading of existing types of capacitive and optical, visible parts of the spectrum, sensors, as the simplest of design and manufacturing technology, with the aim of using them to identify the grain flow is inexpedient and hopeless. It is necessary to develop sensors of another type, which would provide registration to 2-3 parallelly flying grains in the plane of its control.

seeding control, capacitive sensor, optical sensor, grain flow, pulse, control plane

Одержано (Received) 06.10.2018

Прорецензовано (Reviewed) 22.11.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 621.391

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.88-101>

Р.М. Минайленко, доц., канд. техн. наук, **О.М. Дреєв**, канд. техн. наук, **О.Г. Собінов**, викл.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: drey.sanya@gmail.com

О.О. Денисенко

*інженер програмного забезпечення в Ерам Systems, м. Київ, Україна
e-mail: alexey.denisenko.work@gmail.com*

Апаратно-програмний комплекс вимірювання вологості зерна в потоці з інтерфейсом за протоколом Modbus та Owen

В статті розглядається питання створення апаратно-програмного комплексу вимірювання вологості зерна в потоці з послідовним інтерфейсом керування протоколами Modbus або Owen. Процес сушіння зерна є одним із найбільш енерговитратних і важливих із всього циклу зберігання і переробки зерна. Це пов'язано як з прямими витратами, обумовленими втратами якості зернових і неможливістю зберігання при невідповідній вологості, а також великими енергетичними витратами, пов'язаними із забезпеченням процесу сушіння. Описано механізм порційного відбору фіксованого об'єму зерна з потоку для вимірювання його вологості з подальшим вертанням зерна в потік. Описано алгоритми роботи програмного забезпечення керування роботою апаратно-програмного комплексу вимірювання вологості зерна в потоці.

зерно, вимірювання, вологість, апаратно-програмний комплекс

Р.М. Минайленко, доц., канд. тех. наук, А.Н. Дреев, канд. тех. наук, О.Г. Собино, препод.

Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кривницький, Україна

А.А. Денисенко

інженер програмного забезпечення в Eram Systems, г. Київ, Україна

Разработка аппаратно-программного комплекса измерения влажности зерна в потоке с интерфейсом по протоколу Modbus и Owen

В статье рассматривается вопрос создания аппаратно-программного комплекса измерения влажности зерна в потоке с последовательным интерфейсом управляемым протоколами Modbus или Owen. Процесс сушки зерна является одним из самых энергозатратных и важных из всего цикла хранения и переработки зерна. Это связано как с прямыми затратами, обусловленными потерями качества зерновых и невозможностью хранения при несоответствующей влажности, а также большими энергетическими затратами, связанными с обеспечением процесса сушки. Описан механизм порционного отбора фиксированного объема зерна из потока для измерения его влажности с последующим возвратом зерна в поток. Описаны алгоритмы работы программного обеспечения управлением работой аппаратно-программного комплекса измерения влажности зерна в потоке.

зерно, измерения, влажность, аппаратно-программный комплекс

Постановка проблеми. Україна є одним із найбільших виробників зернових на світовому ринку, крім того – виробником достатньо конкурентоспроможних зерносушарок і при цьому майже не має сучасних систем контролю і керування процесом сушіння зерна.

Найбільш вузьке місце таких систем – відсутність відповідних, необхідних вимогам стосовно ціни, точності, надійності, пристроїв, які б забезпечували контроль вологості зернових в процесі сушіння в режимі реального часу. Вологоміри зерна в потоці, що вироблялися в СНД, такі як ПВЗ-3 і РВЗ-3, не застосовувались на практиці через низькі характеристики надійності. Використання імпортованих вологомірів зерна в потоці для більшості підприємств агропромислового комплексу недоступне з причини високої вартості.

Процес сушіння зерна є одним із найбільш енерговитратних і важливих із всього циклу зберігання і переробки зерна. Це пов'язано як з прямими витратами, обумовленими втратами якості зернових і неможливістю зберігання при невідповідній вологості, а також великими енергетичними витратами, які забезпечують процес сушіння.

Як вихід із положення, в більшості випадків, вологість в процесі сушіння визначають лабораторним шляхом. При цьому $T = T_n + T_a + T_c$ – час отримання результатів вимірювання вологості складається із наступних складових: T_n – час, необхідних працівнику лабораторії, для того, щоб взяти пробу на зерносушарці і принести зразок в лабораторію; T_a – час проведення аналізу; T_c – час для відповіді оператору сушарки про результати аналізу.

При використанні традиційних способів вимірювання вологості зернових в потоці, час отримання результатів $T \geq 60$ хвилин, що є неприйнятним, тому, що приводить до нераціональних витрат теплоносіїв, а в деяких випадках і зниження якості зернових.

Враховуючи вищезгадані обставини, на деяких підприємствах застосовують експрес-аналізatori вологості зерна. Ці прилади, як правило, зарубіжного виробництва. Навіть, якщо експрес-аналізатор вологості зерна атестований Держстандартом України і перевірений, використання його має наступні недоліки: наявність людського фактору, який може проявитись в несвоєчасному вимірюванні вологості зерна; відібрана проба, може характеризувати не все зерно, а лише ту частину, яка знаходиться в експрес-аналізаторі вологості зерна. Таким чином, вітчизняний агропромисловий комплекс не має вологоміра зерна в потоці доступного по ціні і відповідаючого необхідним вимогам

та показникам. Тому, розміри втрат, навіть на рівні окремих комбінатів хлібопродуктів (КХП) досягають десятків тисяч гривень в сезон. Актуальність цієї проблеми в цілому для агропромислового комплексу є очевидною.

В теперішній час на вітчизняних зернопереробних підприємствах використовуються прилади для одноразового вимірювання вологості (стаціонарне лабораторне обладнання), або мобільні (ручні) прилади.

Серед зарубіжних виробників поточних вологомірів сипучих матеріалів можна виділити німецьку компанію SWR Engineering. В моделях вологомірів цієї компанії запроваджена система безконтактного вимірювання висоти насипу матеріалу, що транспортується по конвеєрній стрічці. Завдяки цьому вимірювач вологості стає повністю незалежним від режимів роботи конвеєра, продовжуючи здійснювати точні вимірювання вологості потоку.

Мікрохвильові вологоміри застосовуються для вимірювання вологості матеріалів в бункерах та інших технологічних ємностях, спускових жолобах, трубах, при гвинтовій подачі матеріалу і навіть безпосередньо в технологічному процесі. Для цього створені спеціальні модифікації вимірювачів.

Аналіз стандартних схем та методів вимірювання вологості зерна в потоці. Структурна схема апаратно програмного комплексу (АПК) вимірювання вологості зерна в потоці представлена на рис. 1.

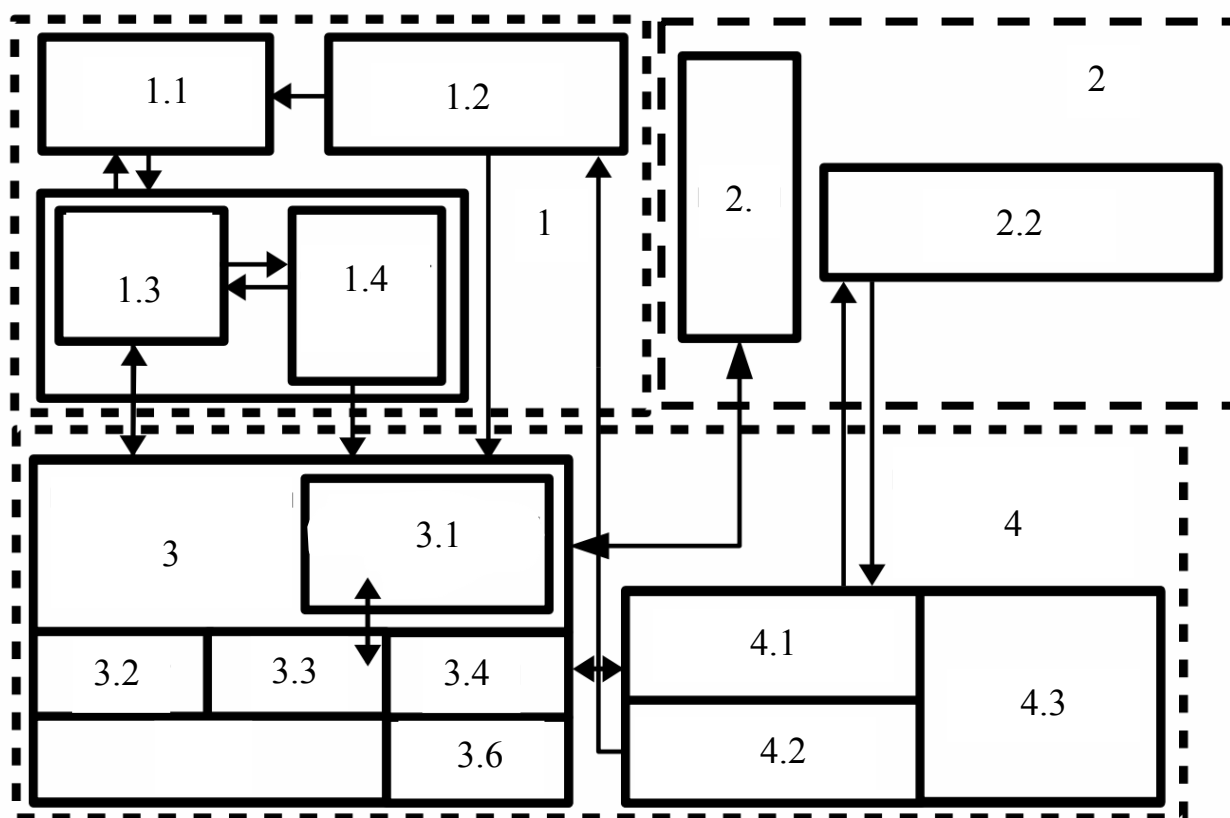


Рисунок 1 – Структурна схема АПК вимірювання вологості зерна в потоці

Джерело: розроблено авторами

Схема складається з чотирьох основних частин: 1 – сенсорний модуль, 2 – інтерфейсний модуль, 3 – обчислювальний модуль, 4 – модуль цифрового керування (верхній рівень).

В свою чергу, сенсорний модуль складається із: 1.1 – сенсора, 1.2 – поворотного механізму, 1.3 – генератора опорної частоти, 1.4 – диференціатора частот.

Сенсор (1.1) забезпечує відбір та зняття аналогового сигналу з потоку зерна. Поворотний механізм (1.2) виконує переміщення відібраної проби з потоку від місця завантаження до місця вивантаження. Генератор опорної частоти (1.3) подає на вимірювальну частину сенсора задану для відповідного типу зерна вхідну частоту. Диференціатор (1.4) порівнює вихідний сигнал з сенсора та опорний (заданий) сигнал і передає інформацію на обробку.

Інтерфейсний модуль (2) містить в собі: 2.1 – мікроконтролер та 2.2 – екран (ЖКІ) і призначений для зберігання та виведення інформації.

До складу обчислювального модуля (3) входить: 3.1 – генератор частоти, 3.2 – STM32, 3.3 – USART, 3.4 – OWEN, 3.5 – 12C (шини), 3.6 – MODBUS.

Мікроконтролер STM32 (3.2) забезпечує перетворення аналогового сигналу в цифровий та виконує математичну обробку даних. Блоки 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 є апаратним інтерфейсом і призначені для обміну даними з верхнім рівнем (PLC, ПЕОМ). Інтерфейсний модуль забезпечує налаштування АПК вимірювання вологості в потоці, керування швидкістю відбору проб зерна та контроль введення/виведення інформації.

Блок цифрового керування (4) складається із: 4.1 – клавіш керування, 4.2 – модуля керування швидкістю, 4.3 – модуля контролю введення/виведення інформації. Склад даного блоку може формуватися за вимогами користувача. Тобто може містити в собі ЕОМ відповідного класу та потужності, або PLC різних виробників для візуалізації і збереження даних.

На рис. 2 представлено загальний вигляд АПК вимірювання вологості зерна в потоці:



1 – електронна частина; 2 – сенсор

Рисунок 2 – АПК вимірювання вологості зерна в потоці з недозуючим сенсором

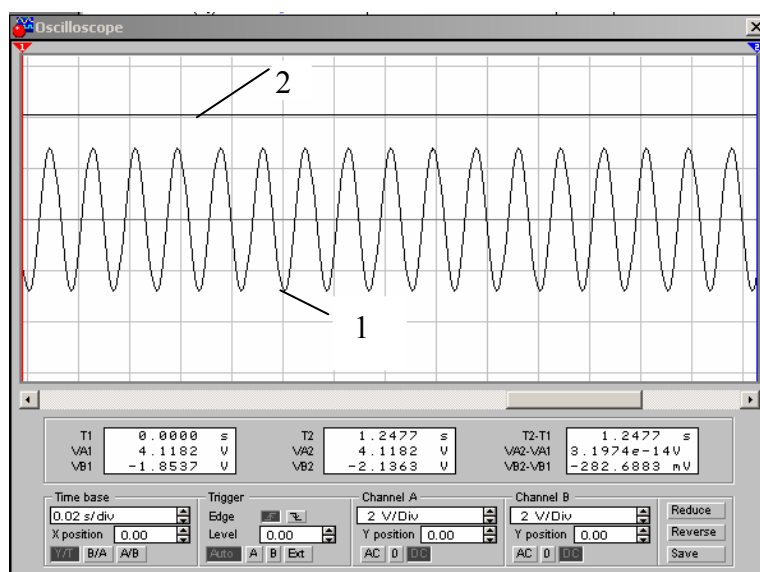
Джерело: розроблено авторами

На рис. 3 показано компоненти електронної частини АПК вимірювання вологості зерна в потоці



Рисунок 3 – Компоненти електронної частини АПК вимірювання вологості зерна в потоці
Джерело: розроблено авторами

Результати моделювання АПК вимірювання вологості зерна в потоці представлено на рис. 4:

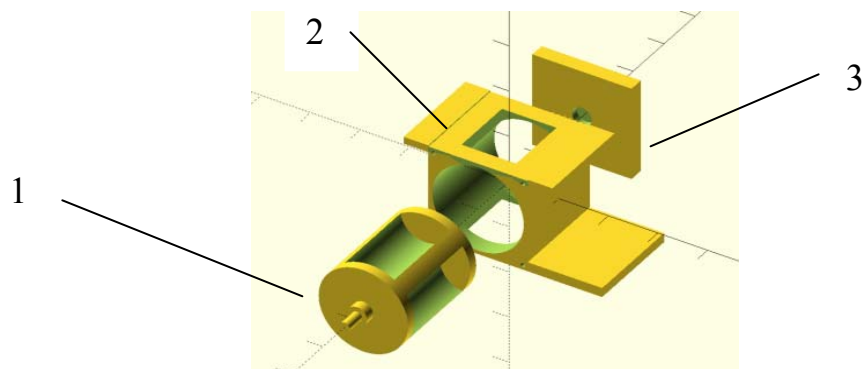


1 – осцилограма вхідного сигналу; 2 – осцилограма вихідного сигналу

Рисунок 4 – Результати моделювання АПК вимірювання вологості зерна в потоці
Джерело: розроблено автором

Постановка задачі. Лабораторні та польові випробування розробленого пристрою показали, що сенсорний пристрій (рис. 2) апаратно-програмного комплексу не забезпечує точності вимірювань вологості зернових в достатній мірі. Причиною цього є те, що потік зерна який проходить через сенсор має безперервний характер і не забезпечується постійна щільність зерна. Тобто динаміка процесу не дає можливості вимірювання вологості зерна з бажаною точністю. Тому подальші дослідження були направлені на вирішення задачі стабілізації показників вимірювання вологості зерна шляхом відбору нормованих доз.

Викладення основноо матеріалу. В результаті проведених досліджень був розроблений механізм відбору проб зерна, який забезпечує його постійну щільність при вимірюванні вологості. Тривимірна модель механізму (сенсора) представлена на рис. 5.



1 – барабан; 2 – корпус; 3 – задня кришка

Рисунок 5 – Тривимірна модель механізму відбору проб зерна

Джерело: розроблено авторами

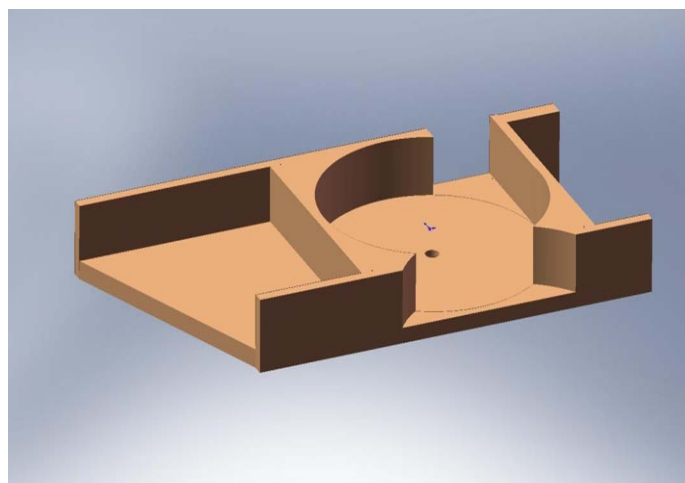


Рисунок 6 – Задня кришка механізму відбору проб зерна

Джерело: розроблено авторами

Механізм відбору проб зерна показано на рис.7.

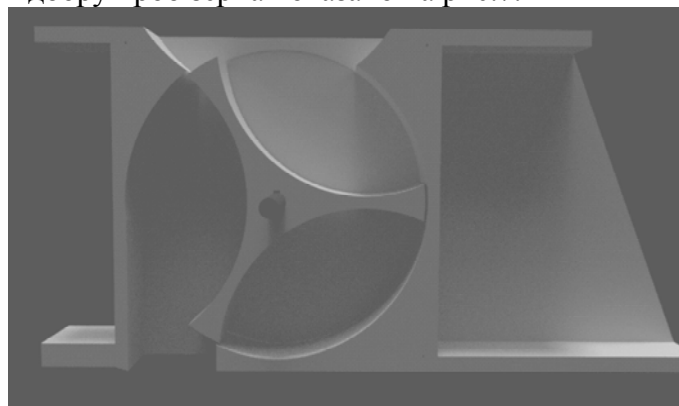
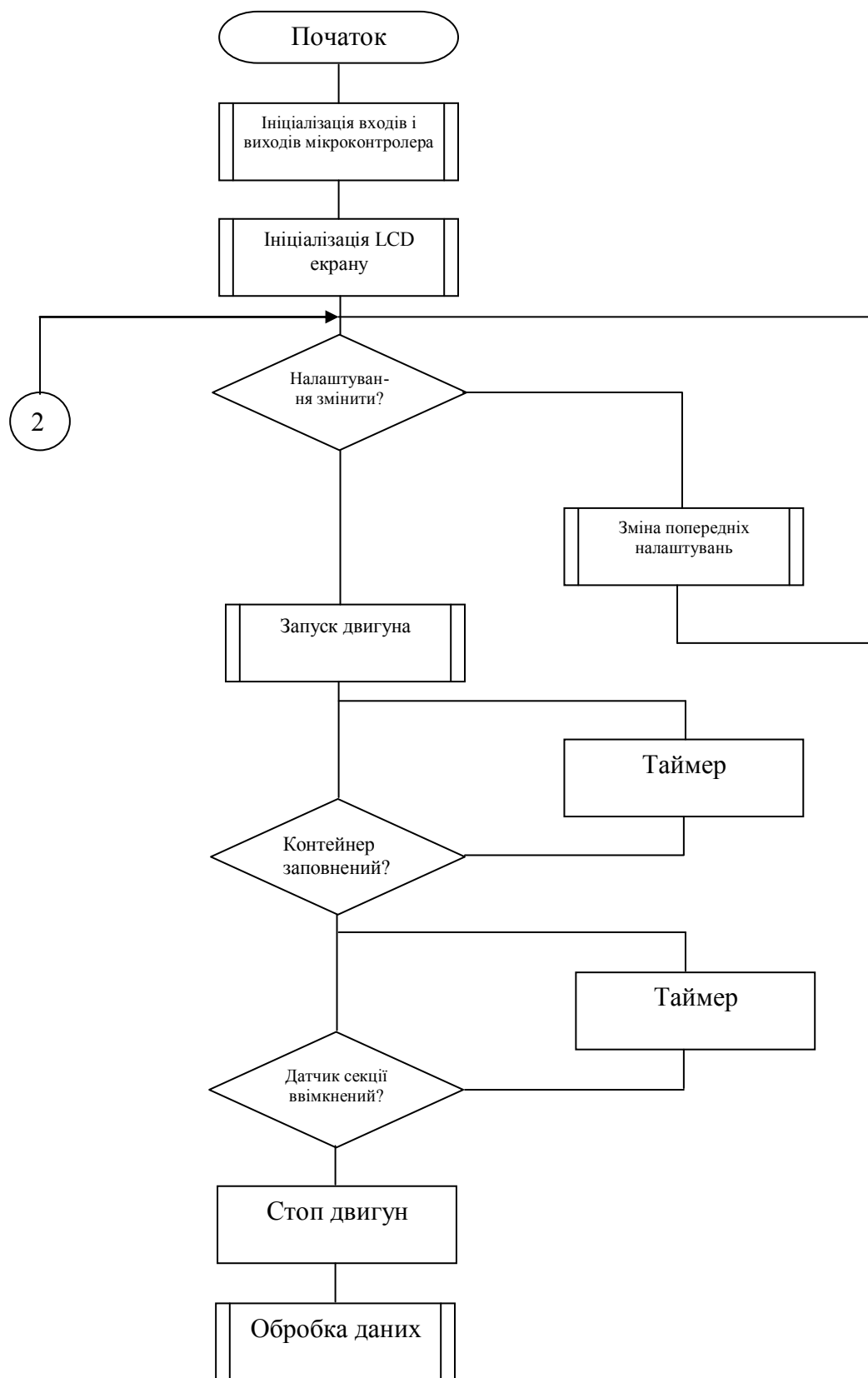


Рисунок 7 – Механізм автоматичного відбору проб зерна в потоці

Джерело: розроблено авторами

Створено відповідне програмне забезпечення, що дало змогу на певний час зупиняти механізм відбору проб зерна для більш точного вимірювання вологості.

Блок-схема основної програми представлена на рис. 8.



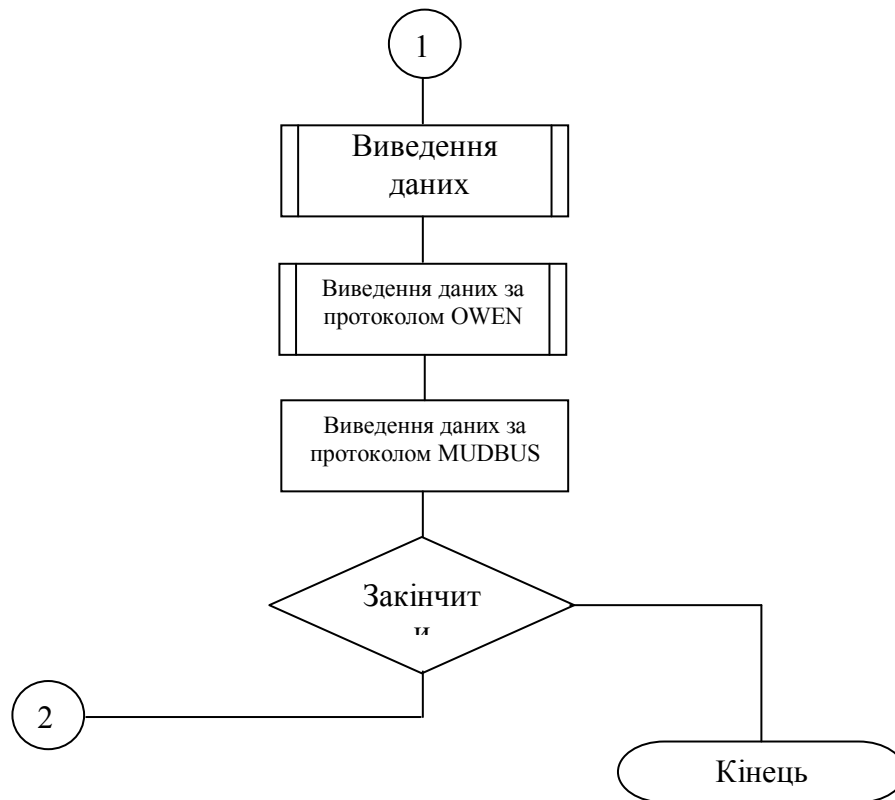


Рисунок 8 – Блок-схема основної програми

Джерело: розроблено авторами

Блок-схеми підпрограм представлені на рис. 9 і рис. 10.

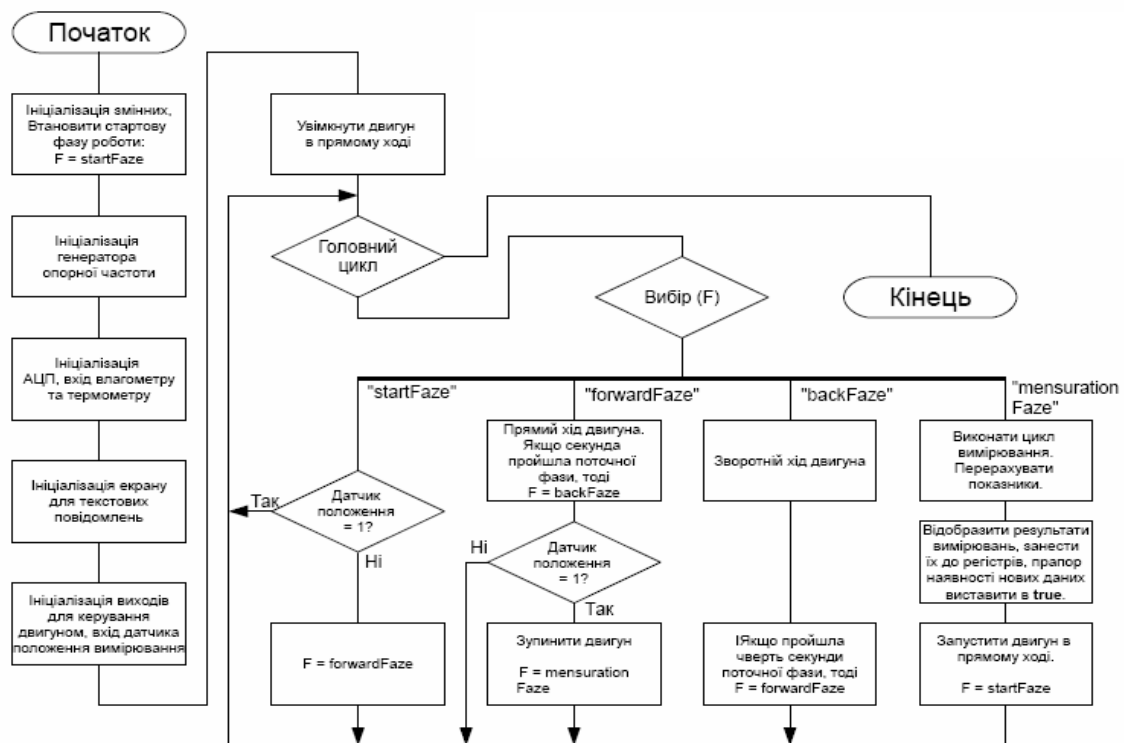


Рисунок 9 – Блок-схема підпрограми керування вимірюванням

Джерело: розроблено авторами

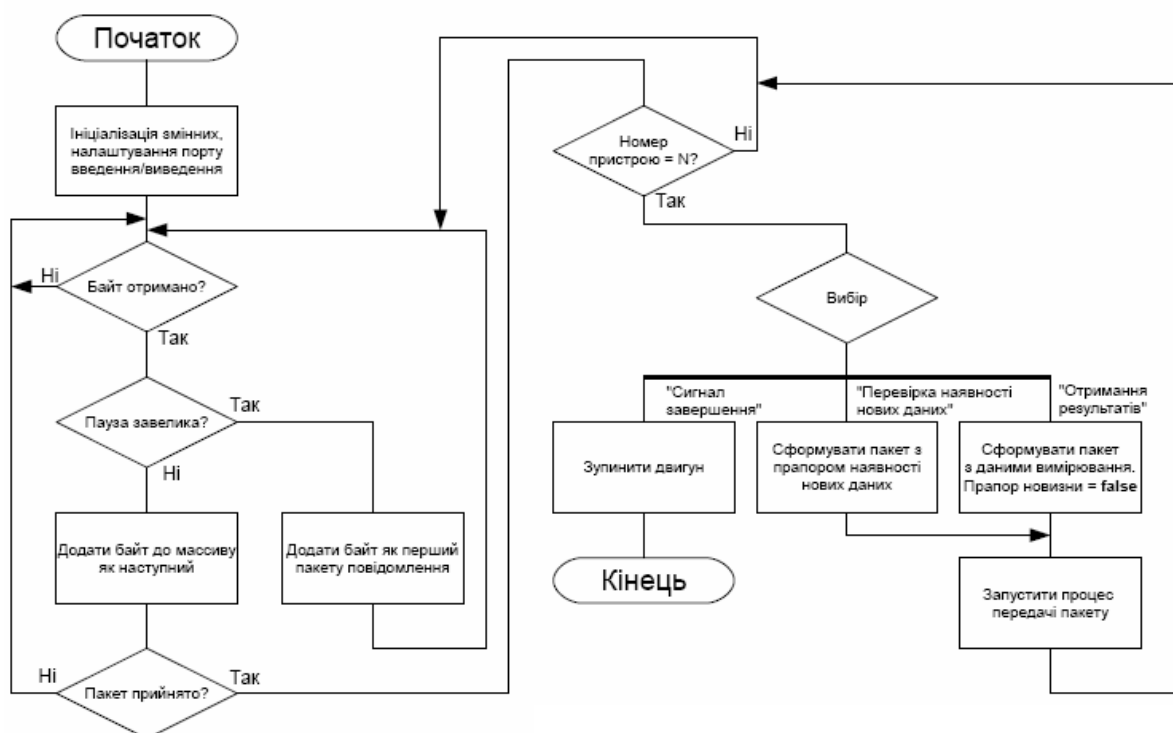


Рисунок 10 – Блок-схема підпрограми керування обміном інформацією
Джерело: розроблено авторами

Інтерфейс АПК показано на рис.11–13:

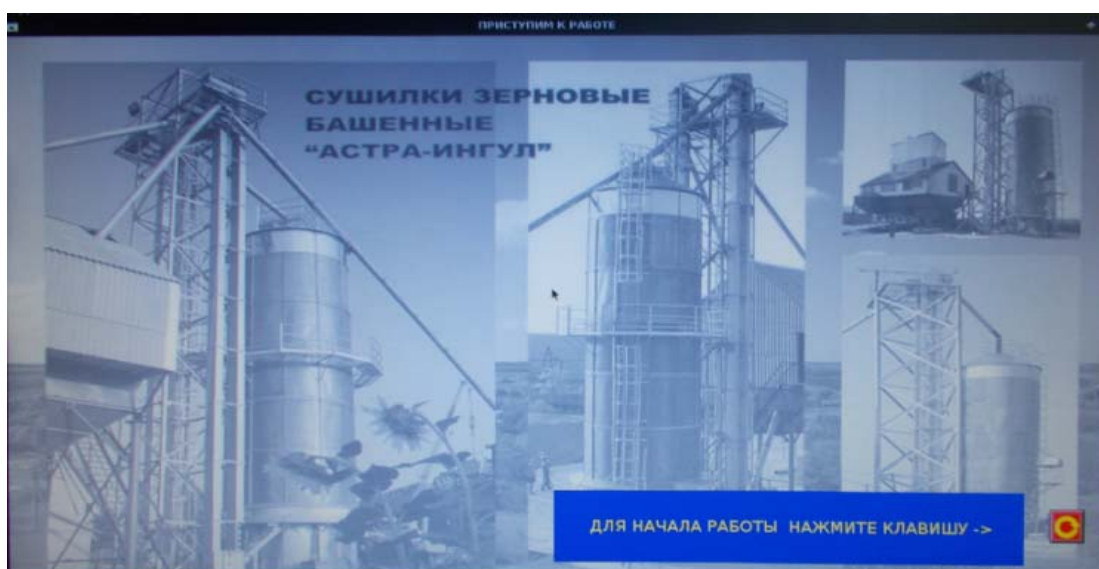


Рисунок 11 – Інтерфейс АПК (початкове завантаження)
Джерело: розроблено авторами

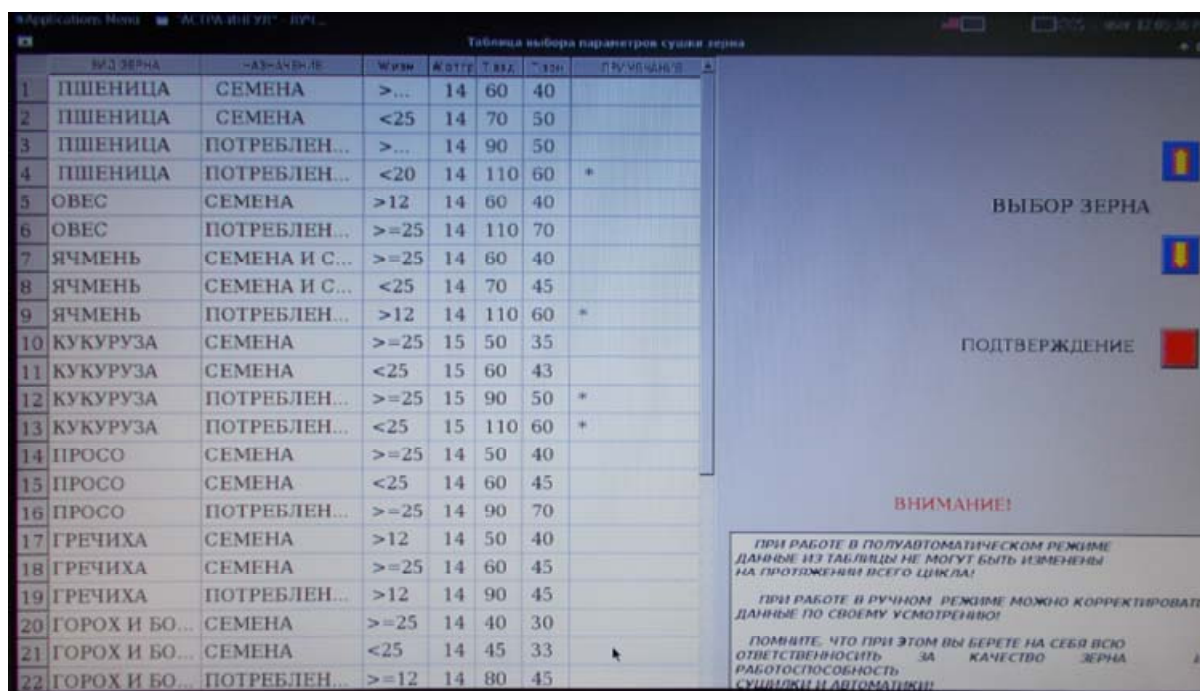


Рисунок 12 – Интерфейс АПК (головне вікно програми)

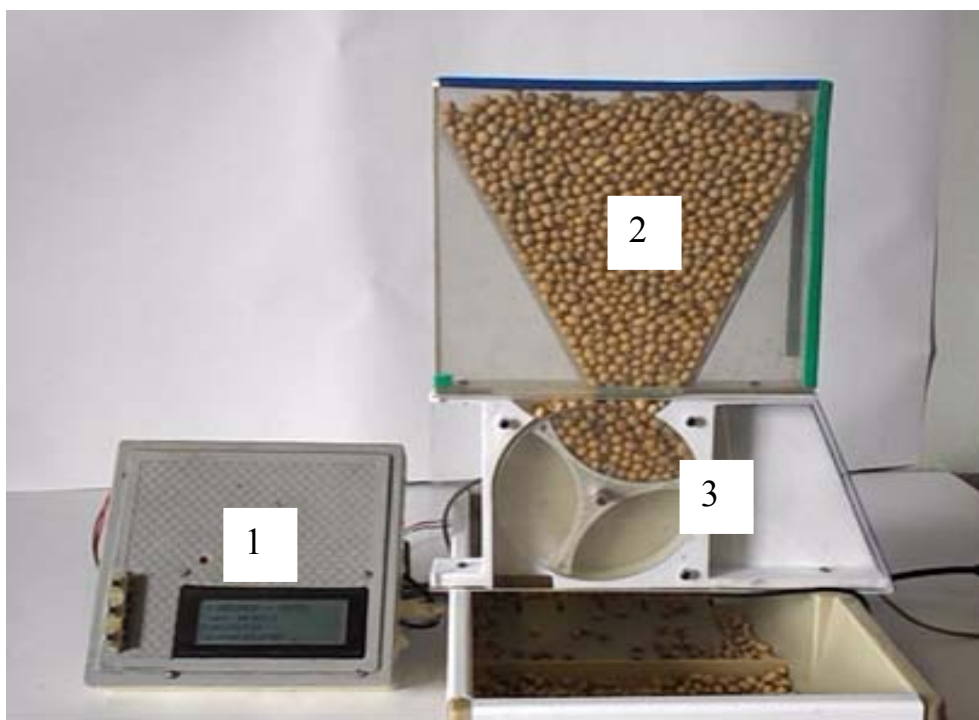
Джерело: розроблено авторами



Рисунок 13 – Интерфейс АПК (результаты работы)

Джерело: розроблено авторами

АПК вимірювання вологості зерна в потоці показано на рис. 14.



1 – електронна частина; 2 – приймаючий бункер; 3 – механізм відбору проб зерна

Рисунок 14 – АПК вимірювання вологості зерна в потоці

Джерело: розроблено авторами

При вивченні ринку європейських і вітчизняних постачальників вологомірів для сипучих продуктів виявилось, що проблема вимірювання вологості в потоці актуальна не лише для України, а й для Європи.

Вологомір повинен володіти такими характеристиками:

- вимірювати вологість зерна в потоці загалом, а не окремих його частинах;
- забезпечувати можливість індикації даних про вологість в режимі реального часу;
- характеризуватися простотою монтажу на зерносушарках;
- забезпечувати можливість використання зворотного зв'язку для рециркуляційного сушіння зерна в автоматичному режимі.

На даний час деякі вітчизняні підприємства намагаються вирішити проблему за допомогою безперервних вологомірів зарубіжного або вітчизняного виробництва. Але ці прилади є ще технічно недопрацьованими (нестабільні показники), мають високу вартість і низьку якість вимірювання.

Висновки:

1. Відсутність системних досліджень вимірювання вологості зерна в потоці для технологічного процесу сушіння в баштових сушарках не дозволяє у повному обсязі використовувати автоматичне керування процесом сушіння з використанням ЕОМ.

2. Розроблені та удосконалені відомі методи для вивчення процесу вимірювання вологості зерна в потоці.

3. Аналіз математичної моделі процесу вимірювання зерна в потоці дозволив встановити, що процес сушіння в баштових сушарках є нестійким з наявністю значних запізнь та нерівномірності вологості матеріалу на вході в систему. На підставі цього

обґрунтовано створення додаткового електромеханічного пристрою для відбору дискретних проб з потоку в залежності від швидкості потоку зерна.

4. Встановлено, що потік зерна створює нерівномірність густини розподілу зерна і значних коливань результатів вимірювання вологості зерна.

5. Отримано експериментальне підтвердження, що розроблений апаратно програмний комплекс (АПК) забезпечує можливість індикації даних про вологість в режимі реального часу з достатньою точністю.

6. Створено механізм автоматичного відбору проб зерна в потоці, що дозволило стабілізувати показники вологості зерна.

7. Розроблено електронну схему вимірювання вологості зерна ємнісним методом.

8. Працездатність розроблених пристроїв та схем підтверджено математичним моделюванням і експериментальними дослідженнями.

Список літератури

1. Птушкин А.Т., Новицкий О.А. Автоматизация производственных процессов в отрасли хранения и переработки зерна / 2-е изд., допол. и перераб. Москва: Агроатомиздат, 1985. 318 с.
2. Шандров Б.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. Москва: Горячая линия - Телеком, 2009. 608с.
3. Конох В.Л. Компьютерная автоматизация производства. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 108с.
4. Пашенко В.Ф. Основы проектирования электронных устройств систем автоматики: навч. посіб. Кіровоград: КІСМ, 1998. 328 с.
5. Головки Д.Б. Автоматика і автоматизація технологічних процесів. Київ: Либідь, 1997. 232 с.
6. Промрадар / Промышленные датчики и приборы управления. URL: www.promradar.ru.
7. Техноком : технологии эффективных решений. URL: www.iktk.ru.
8. Хранение зерна и зерновых продуктов / пер. с англ. канд. техн. наук В.Н. Дашевского, канд. биолг. наук Г.А. Закладного. Москва: Колос, 1978. 472с.
9. Лукин А.А. Учет и отчетность на предприятиях по хранению и переработки зерна: для системы хлебопродуктов. Москва: Агропромиздат, 1991. 141 с.
10. Горлач А.А. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике. Киев: Техніка, 1985. 151 с.
11. Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А., Шекиханов А.М. Итерационные методы повышения точности измерений. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 168 с.
12. Теория автоматического управления / С.Е. Душин и др. Москва: "Высшая школа", 2005. 287с.
13. ОВЕН. Оборудование для автоматизации. www.owen.ru.
14. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство / пер с нем. Москва: Мир, 1982. 512 с.
15. Андриянов А.В., Шпак И.И. Цифровая обработка информации в измерительных приборах и системах. Минск: Высш. шк, 1987. 176 с.
16. Скаржепа В.А., Луценко А.Н. Электроника и микросхемотехника: в 2 ч. : учебн. / под ред. Краснопрошиной. Киев: Выща школа, 1989. Ч.2: Электронные устройства информационной автоматики. 431 с.
17. Куликов В.Н., Миловидов М.Е. Оборудование предприятий элеваторной и зерноперерабатывающей промышленности / 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Агропромиздат. 1991. 383 с.
18. Цециновский В.М. Птушкина Г.Е. Технологическое оборудование зерноперерабатывающих предприятий. Москва: Колос, 1976. 368 с.
19. Ефремов Г.И. Модифицированный квазистационарный метод описания кинетики сушки гигроскопичных материалов // ИФЖ. 1999. Т. 72, No 3. С. 420-424.
20. Ефремов Г., Марковски М., Бялобжезски И. Макрокинетика процессов сушки. Москва.: Изд. МГОУ, 2009. 335 с.
21. Efremov G., Kudra T. Drying kinetics in a pulsed-fluid bed dryer -A modified quasi-stationary approach // Proceedings of International Conference "Energy-saving technologies for drying and hydrothermal processing". Moscow, 2002. V. 3. P. 70-73.
22. Кричевский Е. С. Высокочастотный контроль влажности при обогащении полезных ископаемых. - Москва: Недра, 1972. 216 с.

23. Ренгарт И.И. Влагомеры микрорадар – контроль влажности от приемки зерна до готового продукта. URL: <http://microradar.narod.ru/all/physics/mw1/mw1.htm>
24. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов / Кричевский Е. С. и др. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 136 с.: ил.
25. Исматуллаев П.П., Гринвальд А.Б. Теоретическое и экспериментальное исследование сверхвысокочастотного метода измерения влажности материалов. Ташкент: Изд-во «Фан» УзССР, 1982. 84 с.
26. Бензарь В. К. Техника СВЧ-влажнометрии. Минск: Высшая школа, 1974. 352 с.
27. Многопараметрические влагомеры для сыпучих материалов / Дубов Н.С. и др. Москва: Машиностроение, 1980. 144 с.

References

1. Ptushkin, A.T., Novickij, O.A. (1985). Avtomatizacija proizvodstvennyh processov v otrasli hranenija i pererabotki zerna [Automation of production processes in the grain storage and processing industry]. (2d ed.) Moscow: Agroatomizdat [in Russian].
2. Shandrov, B.V. (2009). Komp'juternoe upravlenie tehnologicheskim processom, eksperementom, oborudovaniem [Computer control of technological process, experiment, equipment]. Moscow: Gorjachaja linija - Telekom[in Russian].
3. Konjuh, V.L. (2006). Komp'juternaja avtomatizacija proizvodstva [Computer automation of production]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU [in Russian].
4. Pashenko, V.F.(1988). Osnovi proektuvannja elektronnih pristroiv sistem avtomatiki [Fundamentals of designing electronic devices for automation systems]. Kirovograd: KISM [in Russian].
5. Holovko, D.B. Avtomatyka i avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv [Automation and automation of technological processes]. Kyiv: Lybid' [in Ukrainian].
6. Pomradar. Promyshlennye datchiki i pribory upravlenija [Promradar. Industrial sensors and control devices]. *promradar.ru*. Retrieved from www.promradar.ru. [in Russian].
7. Tehnokom : tehnologii jeffektivnyh reshenij [Technocom: Efficient Solution Technologies]. *iktk.ru*. Retrieved from www.iktk.ru. [in Russian].
8. Hranenie zerna i zernovyh produktov [Storage of grain and cereal products]. (1978). (V.N. Dashevskogo, G.A. Zakladnogo, Trans.). Moscow: Kolos [in Russian].
9. Lukin, A.A. (1991). Uchet i otchetnost' na predprijatjah po hraneniju i pererabotki zerna: dlja sistemy hleboproduktov [Accounting and reporting at the enterprises for the storage and processing of grain: for the bread products system]. Moscow: Agropromizdat [in Russian].
10. Gorlach, A.A.(1985). Cifrovaja obrabotka signalov v izmeritel'noj tehnike [Digital signal processing in measurement technology]. Kiev: Tehnika [in Russian].
11. Aliev, T.M., Ter-Hachaturov, A.A., Shekhanov, A.M. Iteracionnye metody povyshenija tochnosti izmerenij [Iterative methods to improve measurement accuracy]. Moscow: Jenergoatomizdat [in Russian].
12. Dushin, S.E., Zotov, N.S., Imaev, D.H. et al. Teorija avtomaticheskogo upravlenija [Automatic control theory]. Moscow: "Vysshaja shkola" [in Russian].
13. OVEN. Oborudovanie dlja avtomatizacii [ARIES. Automation equipment]. *owen.ru*. Retrieved from www.owen.ru [in Russian].
14. Titce, U., Shenk, K. (1982). Poluprovodnikovaja shemotekhnika: Spravochnoe rukovodstvo [Semiconductor Circuitry: Reference Guide]. Moscow: Mir [in Russian].
15. Andrijanov, A.V., Shpak, I.I. (1987). Cifrovaja obrabotka informacii v izmeritel'nyh priborah i sistemah [Digital processing of information in measuring devices and systems]. Minsk: Vyssh. Shk [in Russian].
16. Skarzhepa, V.A., Lucenko, A.N. (1989). Jelektronika i mikroshemotekhnika. Jelektronnye ustrojstva informacionnoj avtomatiki [Electronics and microcircuitry. Electronic information automatics devices], (Vols 1-2; Vol. 1), Krasnoproshinoj (Ed.). Kiev: Vyshha shkola [in Russian].
17. Kulikov, V.N., Milovidov, M.E. (1991). Oborudovanie predpriyatij jelevatornoj i zernopererabatyvajushhej promyshlennosti [Equipment of enterprises of the elevator and grain processing industry]. (3d ed.). Moscow: Agropromizdat [in Russian].
18. Cecinovskij, V.M., Ptushkina, G.E. (1976). Tehnologicheskoe oborudovanie zernopere-rabatyvajushhih predpriyatij [Technological equipment for grain processing enterprises]. Moscow: Kolos [in Russian].
19. Efremov, G.I. (1999). Modificirovannyj kvazistacionarnyj metod opisanija kinetiki sushki gigroskopichnyh materialov [Modified quasistationary method for describing the kinetics of drying of hygroscopic materials]. *IFZh*, Vol. 72, 3, 420-424 [in Russian].

20. Efremov, G., Markovski, M., Bjalobrzewski, I. (2009). Makrokinetika processov sushki [Macrokinetics of drying processes]. Moscow: Izd. MGOU [in Russian].
21. Efremov, G., Kudra, T. (2002). Drying kinetics in a pulsed-fluid bed dryer -A modified quasi-stationary approach // Proceedings of International Conference "Energy-saving technologies for drying and hydrothermal processing". Moscow, Vol. 3. P. 70-73. [in English].
22. Krichevskij, E. S. (1972). Vysokochastotnyj kontrol' vlazhnosti pri obogashhenii poleznyh iskopaemyh [High-frequency moisture control during mineral processing]. Moscow: Nedra [in Russian].
23. Rengart I.I. Vlagomery mikroradar – kontrol' vlazhnosti ot priemki zerna do gotovogo produkta [Microradar moisture meters - moisture control from the reception of the grain to the finished product]. *microradar.narod.ru*. Retrieved from <http://microradar.narod.ru/all/physics/mw1/mw1.htm> [in Russian].
24. Krichevskij E. S. et al. Kontrol' vlazhnosti tverdyh i sypuchih materialov [Moisture control of solid and bulk materials]. Moscow: Jenergoatomizdat [in Russian].
25. Ismatullaev, P.R., Grinval'd, A.B. (1982). Teoreticheskoe i jeksperimental'noe issledovanie sverhvysochastotnogo metoda izmerenija vlazhnosti materialov [Theoretical and experimental study of the microwave method for measuring the humidity of materials]. Tashkent [in Russian].
26. Benzar', V. K. (1974). Tehnika SVCh-vlagometrii [Microwave moisture metering technique]. Minsk: Vyshejsjaja shkola [in Russian].
27. Dubov, N.S., Krichevskij, E.S., Nevzlin, B.I. et al. (1980). Mnogoparametricheskie vlagomery dlja sypuchih materialov [Multiparameter moisture meters for bulk materials]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

Roman Minailenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Alexandr Dreev**, PhD tech. sci., **Alexandr Sobinov**, Lecturer
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Alexey Denysenko

Software engineer in Epam Systems, city Kiev, Ukraine

Development of a Hardware-software System for Measuring the Humidity of Grain in a Stream With an Interface Using the Modbus and Owen Protocol

Currently, Ukraine is one of the largest producers of grain in the world market, is quite competitive manufacturer of grain dryers and it does not have modern control systems and process control for grain drying

The most bottleneck of such systems is the lack of appropriate requirements for price, accuracy, reliability of devices, which would provide the humidity control of grain drying process in real time. The grain moisture in the stream, produced in the CIS are not used in practice through a low reliability characteristics. The use of imported grain moisture in the stream for most agricultural enterprises are not available due to high cost.

The process of grain drying is one of the most energy intensive and important of the entire cycle of storage and processing of grain. This is due to direct costs due to loss of quality of grain and the impossibility of storage at improper humidity, as well as large energy costs associated with the provision of the drying process.

As a way out, in most cases, the humidity in the drying process is determined by the laboratory. But when using the traditional methods of measuring grain moisture content, the delivery of the results is nearly 60 minutes, which is unacceptable. This leads to irrational spending of coolants, and in some cases lower quality grain.

In view of the above, some enterprises have used the Express grain moisture analyzers. These devices are usually of foreign origin. Even if the Express analyzer grain moisture certified by state standard of Ukraine and proved to use it has the following disadvantages: the presence of the human factor, which can result in delayed measurement of grain moisture; sample may not characterize all grain, but only the part that is in Express analyzer. Thus, the domestic agro-industrial complex does not have a moisture meter grain flow affordable and meets the necessary requirements and terms of validity measurements and reliability .

Therefore, the size of the losses, even at the level of individual bakery reach tens of thousands of UAH per season. The urgency of this problem in General, agriculture is obvious.

grain, measurements, humidity, hardware and software

Одержано (Received) 18.10.2018

Прорецензовано (Reviewed) 10.12.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 621.793.7

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.102-110>**С.І. Маркович**, канд. техн. наук*Центрально український національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: marko60@ukr.net***Х.Р. Задорожна**, асп., **Г.Г. Веселівська**, канд. техн. наук, **В.М. Гвоздецький**, канд. техн. наук, **Я.Я. Сірак**, асп., **Я.С. Корінь**, інж.*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна*

Структура, зносотривкість та корозійна тривкість покриттів VC-FeCr та VC-FeCrCo , отриманих надзвуковим газополуменевим напиленням HVOF

Досліджено зносостійкість та корозійну стійкість покриттів нанесених надзвуковим газополуменевим методом напилення (HVOF – High Velocity Oxygen Fuel Flame Spraying process, паливо пропан-кисень). Покриття напиляли з використанням установок Diamond Jet Hybrid gun (паливо пропан-кисень) та JP5000 gun (гас-кисень). Для порівняння використано метод плазмового напилення покриттів у динамічному вакуумі (PSCDV), що забезпечує найвищу якість газотермічних покриттів. Порошки для напилення виготовлено методом механічного легування із використанням планетарного млина. Вихідними компонентами для цього брали порошки карбіду ванадію, феррохрому та сплаву кобальту із нікелем. Встановлено, що зносотривкість напилених покриттів вказаними методами в 75...100 разів вища, ніж основи Д16, в 3...5 разів вища, ніж сталі ШХ15 (HRC60 за тертя жорстко закріпленим абразивом).

Оцінено корозійно-електрохімічну властивість покриттів в 3%-му розчині NaCl за температури $20 \pm 0,2$ °C і виявлено, що вони мають високу корозійну тривкість, яка корелює з їхньою поруватістю. Довготривала експозиція зразків із покриттям у 3% -ному розчині NaCl призводить до проникнення агресивного середовища до межі розділу покриття-підкладка, що може спричинити підплівкову корозію та відшарування покриття. Встановлено, що найвищу корозійну тривкість має покриття VC-FeCrCo, поруватість якого не перевищує 0,5%, отриманий плазмовим методом у динамічному вакуумі. Його корозійні струми в 2 рази нижчі порівняно з тим же покриттям, отриманим методом HVOF.

напилення, покриття, структура, зносотривкість, корозійна тривкість, надзвуковий газополуменевий метод, метод плазмового напилення покриттів у динамічному вакуумі

С.И. Маркович, канд. техн. наук*Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина***Х.Р. Задорожна**, асп., **Г.Г. Веселивская**, канд. техн. наук, **В.М. Гвоздецкий**, канд. техн. наук, **Я.Я. Сирак**, асп., **Я.С. Коринь**, инж.*Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины, г. Львов, Украина*

Структура, износостойкость та коррозионная стойкость покрытия VC-FeCr и VC-FeCrCo , полученных сверхзвуковым газопламенным методом напыления HVOF

Исследовано износостойкость и коррозионную стойкость покрытий нанесенных сверхзвуковым газополуменевым методом напыления (HVOF – High Velocity Oxygen Fuel Flame Spraying process, топливо пропан-кисень). Покрытие напыляли с использованием установок Diamond Jet Hybrid gun (топливо пропан-кисень) и JP5000 gun (керосин-кислород). Для сравнения использован метод плазменного напыления покрытий в динамическом вакууме (PSCDV), который обеспечивает наивысшее качество газотермических покрытий. Порошки для напыления изготовлены методом механического легирования с использованием планетарной мельницы. Исходными компонентами для этого брали порошки карбида ванадия, феррохрома и сплава кобальта с никелем. Установлено, что износостойкость напыленных покрытий указанными методами в 75...100 раз выше, чем основы Д16, в 3...5 раз выше, чем стали ШХ15 (HRC60 за трение жесткозакрепленным абразивом).

© С.І. Маркович, Х.Р. Задорожна, Г.Г. Веселівська, В.М. Гвоздецький,
Я.Я. Сірак, Я.С. Корінь, 2018

Оценено коррозийно-электрохимическое свойство покрытий в 3%-ом растворе NaCl за температуры $20 \pm 0,2$ °C и выявлено, что они имеют высокую коррозионную прочность, которая коррелирует с их пористостью. Долговременная экспозиция образцов с покрытием в 3%-ному растворе NaCl приводит к проникновению агрессивной среды в предел раздела покрытие-подкладка, которая может вызывать подпленочную коррозию и отслаивание покрытия. Установлено, что наивысшую коррозионную прочность имеет покрытие VC-FeCrCo, пористость которого не превышает 0,5%, полученным плазменным методом в динамическом вакууме. Его коррозионные токи в 2 раза ниже сравнительно с тем же покрытием, полученным методом HVOF.

напыление, покрытие, структура, износостойкость, коррозионная прочность, сверхзвуковой газопламенный метод, метод плазменного напыления покрытий в динамическом вакууме

Постановка проблеми. Під час експлуатації сільськогосподарських машин їх механізми та деталі, здебільшого, працюють в жорстких умовах контакту з високотемпературними газами, різними агресивними середовищами та абразивними речовинами, які спричиняють інтенсивну корозію та знос поверхні. Внаслідок підвищення швидкодії машин і механізмів, збільшення їх габаритів і продуктивності, умови роботи поверхні деталей стають жорсткішими. У зв'язку з цим необхідно вжити спеціальні заходи, які забезпечать радикальне підвищення корозійної і зносотривкості та інших важливих характеристик поверхні матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами ряду робіт пропонується успішно вирішити цю проблему, застосовуючи методи газотермічного напылення, як способу поверхневого зміцнення матеріалу [1–3].

Газотермічне напылення дає змогу наносити покриття з широким спектром робочих характеристик. На сьогодні накопичено великий досвід практичного застосування цієї технології в різних областях техніки, зокрема металургії, будівництві і ракетобудуванні, електроніці та медицині [4].

Серед цих методів надзвуковий газополуменевий (HVOF – High Velocity Oxygen Fuel Flame Spraying process) забезпечує надзвичайно високу міцність зчеплення покриттів із металевою основою, достатньо продуктивний та помірно вартісний [4, 5]. Установки надзвукового напылення сконструйовані за класичною схемою роботи рідкопаливних реактивних двигунів, в яких швидкість газового струменя, що виходить із сопла пальника становить понад 2000 м/с. При цьому досягається висока (99 %) щільність напылених покриттів. Нижче запропоновано використовувати порошкові суміші на основі карбіду ванадію замість карбіду вольфраму. Карбід ванадію має високу мікротвердість та малу питому вагу, тому очікуємо суттєвого здешевлення порошкових сумішей на його основі.

Постановка завдання. Задачою дослідження є вивчення структури, рівня зносотривкості та корозійної стійкості покриттів vc-fecr та vc-fecrco, отриманих надзвуковим газополуменевим напыленням hvof.

Виклад основного матеріалу. Методика дослідження. Покриття напыляли з використанням установок для високошвидкісного напылення покриттів Diamond Jet Hybrid gun (паливо пропан–кисень) та JP5000 gun (гас–кисень) [5]. Тиск у камері згоряння становив до 1,0 МПа, швидкість частинок – до 700 м/с для порошку VC- FeCr. Витрата порошку – 10 кг/год. Попередня обробка – дробоструминна обробка + очистка в ультразвуковій ванні (етиловий спирт).

Для порівняння використали метод плазмового напылення покриттів у динамічному вакуумі (ПНПДВ), як такий, що забезпечує найвищу якість покриттів [5].

Покриття товщиною 100 μm напыляли на зразки-диски, вирізані з прутка алюмінієвого сплаву Д16 діаметром 50 мм, товщиною 10 мм. Склад покриття, метод та дистанція напылення та фракція порошків наведено в табл. 1. Порошки для напылення

виготовляли методом механічного легування із використанням планетарного млина. Вихідними компонентами для цього були порошки карбіду ванадію, ферохрому та сплаву кобальту із нікелем.

Таблиця 1 – Характеристики методу напилення покриттів

Склад покриття	Відстань до підкладки, мм	Фракція порошку, мкм	Установки
VC- FeCr	250	20...45	DJH
	300		
VC- FeCrCo	250		
	300		
VC-FeCr	300	20...30	JP5000
VC- FeCrCo		20...45	
		20...30	
		20...45	

Джерело: розроблено на підставі [5].

Абразивне зношування за тертя нежорстко закріпленими абразивними частинками виконували згідно з ГОСТ 23.208-79 [6]. Кварцовий пісок просувували (його вологість не перевищувала 0,16 %), а гумовий диск заправляли шліфувальною шкіркою типу 2 (ГОСТ 6456-75) зернистістю № 8П (ГОСТ 3647-71), закріпленою на зразку-держаку у вигляді плоскої сталевий пластини. У зону контакту гумового круга і зразка за допомогою дозувального пристрою постійно подавали абразив. Режим тертя: навантаження $P = 2,4$ Н, швидкість обертання диска – 25 м/хв, абразив – фракціонований та просушений кварцевий пісок з розміром частинок 200...1000 мкм. Тривалість випробування 30 хв. Діаметр гумового диска – 48...50 мм, його товщина – $15 \pm 0,1$ мм.

Абразивне зношування за тертя жорстко закріпленими абразивними частинками здійснювали абразивним диском із електрокорунду середньом'якої твердості СМ-2 на керамічній зв'язці 7К15 діаметром 150 мм та товщиною 8 мм. Зернистість електрокорунду – 250...315 мкм (25А, 25Н), лінійна швидкість тертя – 100 м/хв, навантаження у зоні лінійного контакту – 1,5 кг. Знос оцінювали за втратою маси зразків з точністю до $2 \cdot 10^{-4}$ г на електронній аналітичній вазі марки KERN ABJ 220 4М. Тривалість випробування 30 хв.

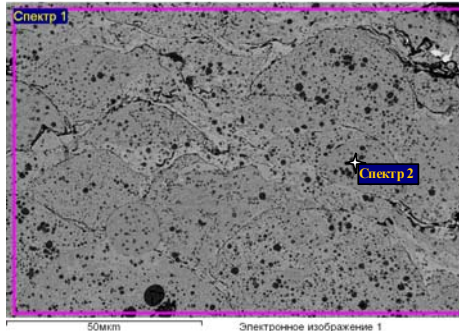
Корозійно-електрохімічні властивості покриттів оцінено в 3%-му розчині NaCl за температури $20 \pm 0,2$ °С. Характеристики корозійних процесів досліджували в потенціодинамічному режимі з використанням вольтамперометричної системи СВА-1БМ за триелектродною схемою: робочий електрод – покриття на сплаві Д16, електрод порівняння – хлоридсрібний типу ЭВЛ-1М1, допоміжний – платиновий. Швидкість зміни потенціалу 2 мВ/с. Поляризаційні криві використовували для визначення швидкості корозії та отримання інформації про характер корозійного процесу [7].

Для електрохімічних досліджень робочу частину поверхні зразка виокремлювали циліндричними комірками площею 2 см^2 .

Результати експерименту. Структури покриттів, отриманих методами Diamond Jet Hybrid gun та JP5000 gun, практично не відрізняються між собою (рис. 1а, б) та мають ламелярну будову, де ламелі – це закристалізовані слабдеформовані краплини порошкової суміші. Це свідчить, що краплини, які розділені між собою ледь помітними прошарками оксидів, у момент удару об напилювану поверхню були у розплавленому стані лише з поверхні. Проте здебільшого між краплинами відбулось сплавлення без

оксидних прошарків. У матричній фазі покриттів на основі ферохрому виявлено розсіяні виділення карбідів ванадію круглої форми (чорні включення) розміром від 1 до 5 мкм. Поруватість покриття не перевищує 2 %.

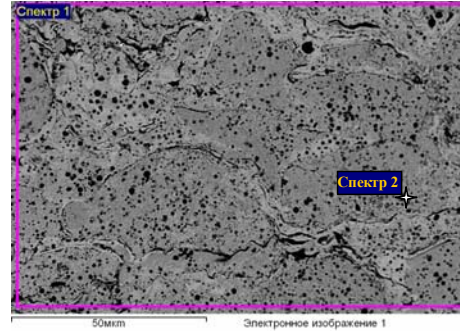
Додавання порошку CoNi у склад порошкової суміші призводить до укрупнення карбідів ванадію у покритті, та набуття ними переважно неправильної форми (рис. 1в, г). Крім цього, в структурі покриття зустрічаються ламелі сплаву CoNi (ламелі світлого кольору). Поруватість дещо зменшується і становить 1...1,5 %.



Спектр 1		
Елемент	мас, %	ат, %
C	4,44	17,48
Si	0,35	0,59
V	17,58	16,33
Cr	13,09	11,92
Fe	62,84	53,24
W	1,70	0,44
Всього	100,00	

Спектр 2		
Елемент	мас, %	ат, %
C	12,49	38,21
V	76,34	55,08
Cr	6,19	4,38
Fe	2,91	1,92
W	2,07	0,41
Всього	100,00	

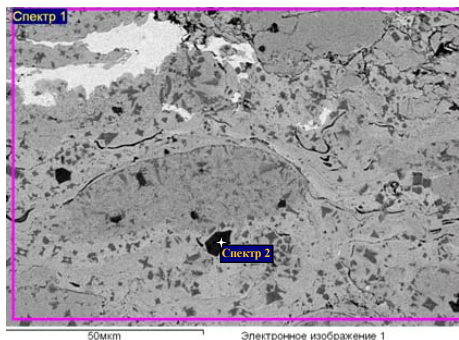
а



Спектр 1		
Елемент	мас, %	ат, %
C	5,60	21,07
Si	0,82	1,32
V	17,68	15,70
Cr	12,90	11,23
Fe	61,83	50,08
W	1,17	0,61
Всього	100,00	

Спектр 2		
Елемент	мас, %	ат, %
C	17,06	47,18
V	72,23	47,10
Cr	5,16	3,30
Fe	3,43	2,04
W	2,12	0,38
Всього	100,00	

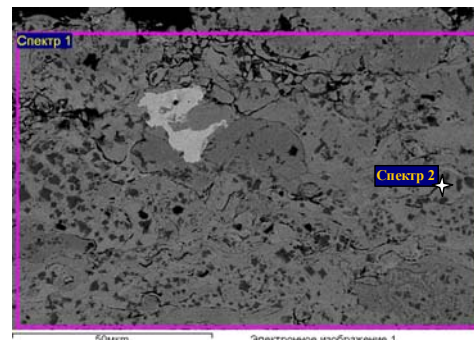
б



Спектр 1		
Елемент	мас, %	ат, %
C	3,04	12,22
Si	1,78	3,06
V	18,44	17,46
Cr	25,04	23,23
Fe	38,11	32,91
Co	8,46	6,93
Ni	5,12	4,21
Всього	100,00	

в

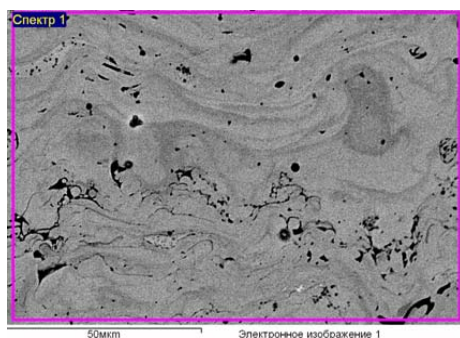
Спектр 2		
Елемент	мас, %	ат, %
C	3,22	12,68
V	40,29	37,42
Cr	34,70	31,57
Fe	18,92	16,03
Co	2,88	2,31
Всього	100,00	



Спектр 1		
Елемент	мас, %	ат, %
C	2,70	10,10
O	3,81	10,70
Si	1,74	2,79
V	18,82	16,62
Cr	24,84	21,49
Fe	37,29	30,04
Co	8,27	6,32
Ni	2,53	1,94
Всього	100,00	

г

Спектр 2		
Елемент	мас, %	ат, %
C	2,59	10,43
V	39,25	37,19
Cr	35,40	32,86
Fe	19,37	16,75
Co	3,39	2,78
Всього	100,00	



Спектр 1		
Елемент	мас, %	ат, %
C	4,47	16,17
O	3,54	9,62
Si	0,79	1,23
V	18,17	15,49
Cr	12,17	10,16
Fe	60,85	47,32
Всього	100,00	

д

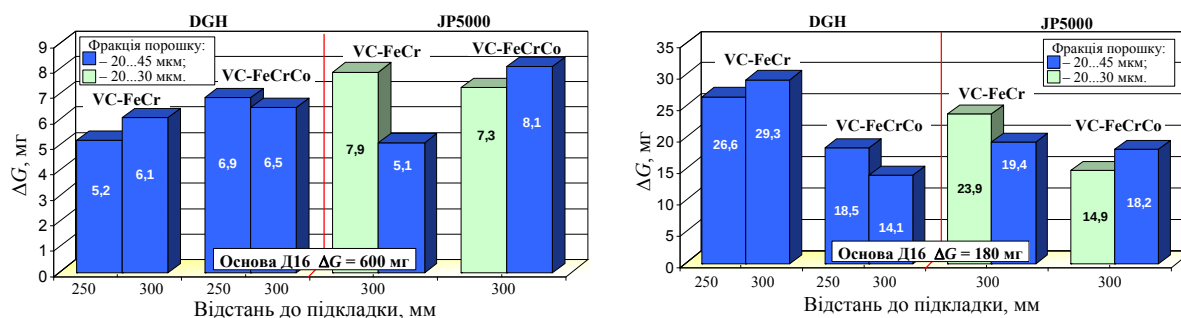
а – VC-FeCr Diamond Jet Hybrid; б – VC-FeCr JP5000 gun; в – VC-FeCrCo Diamond Jet Hybrid gun; г – VC-FeCrCo JP5000 gun, д – PSCDV

Рисунок 1 – Структура покриттів, отриманих методом HVOF

Джерело: розроблено автором

Покриття, отримані методом плазмового напилення у динамічному вакуумі, також мають ламелярну будову. Однак, на відміну від HVOF покриттів, більшість краплин практично сплавлені між собою, а ламелі сильно здеформовані, що свідчить про те, що краплини в момент удару об напилювану поверхню були повністю у розплавленому стані. Карбіди ванадію надзвичайно малі – менше 500 нм (рис. 1д). Поруватість такого покриття не перевищує 0,5 %.

За умов випробування жорстко закріпленим абразивом покриття напилені методами HVOF, а також PSCDV ($\Delta G = 7,1$ мг) мають вищу зносостійкість, порівняно зі сталлю ШХ15, загартованою на 60 HRC ($\Delta G = 30$ мг). Дещо вищу зносостійкість мають покриття отримані методом Diamond Jet Hybrid gun порівняно із JP5000 gun та PSCDV. Додавання порошку CoNi у порошкову суміш знижує зносостійкість покриттів за таких умов випробування (рис. 2а).



а

б

Рисунок – 2 Втрата маси зразків під час тертя жорстко закріпленими (а) та нежорстко закріпленими абразивними частинками (б)

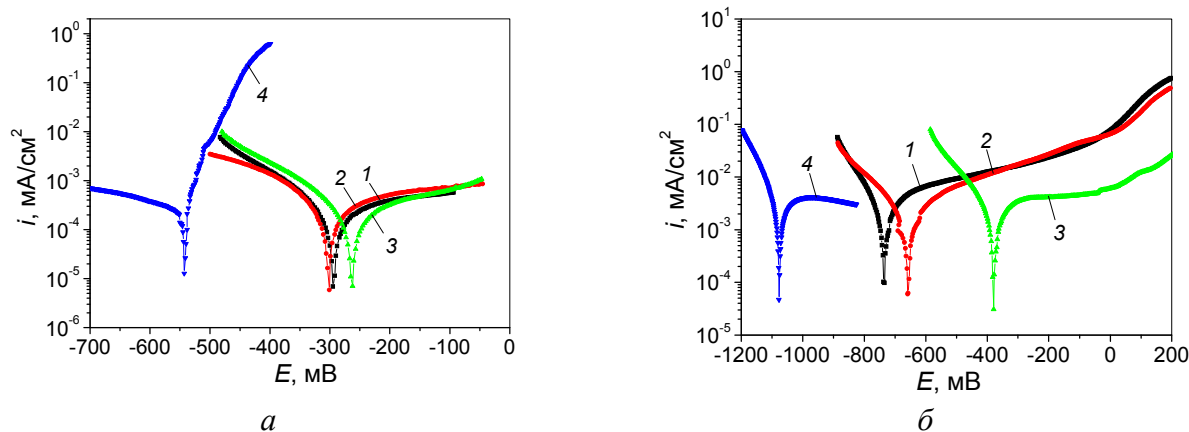
Джерело: розроблено автором

За умов випробування нежорстко закріпленим абразивом зносостійкість покриттів VC-FeCr та VC-FeCrCo у 3...5 разів вища, ніж в еталона зі сталі ШХ15 ($\Delta G = 69,5$ мг) (рис. 2б).

Додавання порошку CoNi у порошкову суміш призводить до збільшення розміру карбідів ванадію від 0,5 до 10 мкм, що підвищує зносостійкість покриттів на 50...100 % для систем напилення Diamond Jet Hybrid gun та JP5000 gun.

Для з'ясування корозійно-електрохімічної поведінки одержаних методом HVOF та ПНПДВ покриттів було проведено потенціодинамічні дослідження в середовищі 3%

розчину NaCl. Було виявлено, що у початковий момент їх занурення в корозивне середовище (рис. 3а) поляризаційні криві зсуваються в позитивну область потенціалів відповідно на 250 мВ та 300 мВ, порівняно з основою. Форма кривих свідчить про ідентичність процесів, які відбуваються на електроді у катодній області потенціалів за цих умов. Анодні гілки потенціодинамічних поляризаційних кривих у середовищі NaCl типові для пасивних матеріалів з низькою густиною струму в широкій області потенціалів (рис. 3).



а – без експозиції; б – експозиція 8 днів.

Рисунок 3 – Потенціодинамічні криві покриттів системи VC-FeCr (1) та VC-FeCrCo (2, 3), одержаних HVOF (1, 2) та PSCDV (3) на сплаві Д16 (4) у середовищі 3%-го розчину NaCl

Джерело: розроблено автором

Густина струму пасивного стану для покриттів є порядку 10^{-3} mA/cm^2 . Поступове зміщення потенціалу в анодну область значень від потенціалу корозії супроводжується суттєвим зростанням швидкості розчинення з подальшою стабілізацією через 100...150 мВ. Анодні струми насичення для покриттів, одержаних методом HVOF майже однакові.

Проаналізувавши поляризаційні криві (рис. 3) можна встановити, що електрохімічна корозія основи у початковий момент протікає з катодним контролем ($b_k > b_a$), а покриттів – з анодним ($b_a > b_k$), причому поступове зміщення потенціалу в анодну область значень від потенціалу корозії супроводжується досить повільним зростанням швидкості розчинення без чітко вираженої області пасивності.

Експозиція покриттів впродовж 8 днів у корозивному середовищі спричиняє зміщення їх потенціалів корозії в катодну область, а електрохімічна корозія усіх зразків відбувається з анодним контролем. Лише на покритті отриманому методом PSCDV, простежуємо чітку виражену пасивну область (рис. 3б, крива 3). Під час довготривалих досліджень (рис. 4) встановили, що впродовж 8 днів стаціонарний потенціал покриттів не досягає потенціалу підкладки – сплаву Д16, який в 3%-му розчині NaCl становить ~ -800 мВ. Однак таке суттєве зміщення електродного потенціалу покриттів, одержаних методом HVOF (криві 1 та 2) від -100 мВ до -540 мВ свідчить про проникнення корозивного середовища через пори покриття до меж розділу електродугового покриття-підкладки. Такого ефекту не спостерігали для покриття VC-FeCrCo, отриманого методом PSCDV.

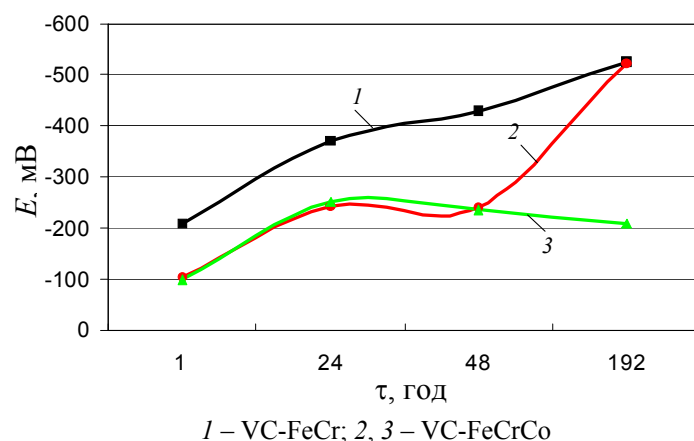


Рисунок 4 – Зміна електродного потенціалу в часі покриттів системи VC-FeCr та VC-FeCrCo, одержаних HVOF (1, 2) та PSCDV (3), на Д16, в середовищі 3%-го розчину NaCl

Джерело: розроблено автором

На рис. 5 підсумовано результати корозійно-електрохімічних досліджень покриттів на сплав Д16, одержаних різними методами.

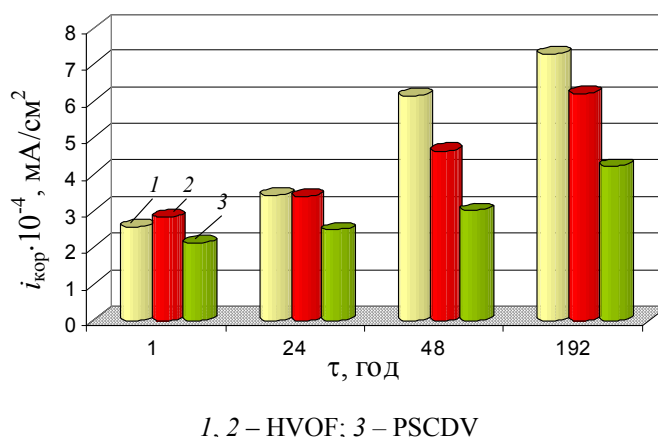


Рисунок 5 – Залежність корозійної тривкості покриттів системи VC-FeCr (1) та VC-FeCrCo (2, 3) в середовищі 3%-го розчину NaCl, від способу одержання

Джерело: розроблено автором

Виявлено, що покриття VC-FeCrCo, одержаний методом PSCDV, має найвищу корозійну тривкість, яка зумовлена його мінімальною поруватістю. Його струми корозії в 2 рази менші, порівняно з таким же, тільки одержаним методом HVOF. Через 24 год корозійна поведінка покриттів VC-FeCr та VC-FeCrCo ідентична, проте за подальшої експозиції в середовищі 3%-го розчину NaCl струми корозії покриттів VC-FeCr зростають інтенсивніше, що, ймовірно, пов'язано з його більшою поруватістю, яка суттєво збільшує площу взаємодії середовища з покриттям.

Висновки. Покриття на основі VC-FeCr, отриманий методом HVOF, має високу абразивну зносотривкість незалежно від виду палива. Додавання CoNi в напилюваний порошок спричиняє збільшення розмірів карбідних включень від 0,5 до 10 мкм, що призводить до зростання зносостійкості покриттів на 50...100 %.

Встановлено, що найвищу корозійну тривкість покриттів однакового хімічного складу визначає метод напилення, який забезпечує найменшу їх поруватість. Виявлено, що додаток кобальту у покриття VC-FeCrCo несуттєво підвищує його корозійну тривкість. Довготривала експозиція в 3%-му розчині NaCl покриттів із поруватістю

більше 0,5 % призводить до проникнення корозивного середовища до меж розділу покрив-підкладка, що може спричинити відшарування покриву.

Список літератури

1. Трибологічні властивості комбінованих метало-оксидних шарів на легких сплавах / М.М. Студент та ін. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, 2012. 48. №2. С.55–65.
2. Ступницький Т. Р., Студент М.М., Похмурська Г.В., Гвоздецький В.М. Оптимізація вмісту хрому в порошкових дротах системи Fe–Cr–C, Fe–Cr–B за корозійною тривкістю електродугових покриттів. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. Львів, 2016. Т. 52. №2. С.23–29.
3. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures / B. Wielage et. al. *Surface & Coatings Technology*, 2013. P. 27-35.
4. Студент М. М., Похмурська Г. В., Задорожна Х. Р. Структура та зносотривкість покриттів VC-FeCr та VC-FeCrCo, отриманих надзвуковим газополуменевим напиленням HVOF. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. Львів, 2018. Т. 54, №1. С.31–38.
5. Похмурська Г.В., Студент М.М., Похмурський В.І. Газотермічні покриття: навч. пос. Львів: “Простір-М”, 2017. 180 с.
6. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. Москва: Наука. 1970. 272с.
7. Н.Д.Томашов, Н.П.Жук, В.А.Титов, Веденева М.А. Лабораторные работы по коррозии и защиты металлов. Изд-во “Металлургия”, 1971. 280 с.

References

1. Student, M.M., Dovhuniy, V.M., Klaviv, M.D., Posuvajlo, V.M., Shmyrko V.V. et al. (2012). Trybolohichni vlastyvosti kombinovanykh metalo-oksydnykh shariv na lehkykh splavakh [Tribological properties of composite metal-oxysdokeramichnyh alloy layers]. *Fiz.-khim. mekhanika materialiv*, Vol. 48, 2, 55–65 [in Ukrainian].
2. T. R. Stupnyts'kyj, M.M. Student, H.V. Pokhmurs'ka, V.M. Hvozdet's'kyj (2016). Optymizatsiia vmistu khromu v poroshkovykh drotakh systemy Fe–Cr–C, Fe–Cr–B za korozijnou tryvkistiu elektroduhovykh pokryttiv [Optimization of chromium content in powder wires Fe–Cr–C, Fe–Cr–B by corrosion resistance of electric arc coatings]. *Fiz.-khim. mekhanika materialiv*, Vol. 52, 2. 23–29 [in Ukrainian].
3. Wielage, B., Pokhmurska, H., Student, M., Gvozdeckii, V., Styupnyckyj, T. et. al. (2013). Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures. *Surface & Coatings Technology* [in English].
4. Student, M. M., Pokhmurs'ka, H. V., Zadorozhna, Kh. R. (2018). Struktura ta znosotryvkist' pokryviv VC-FeCr ta VC-FeCrCo, otrymanykh nadzvukovym hazopolumenevym napylenням HVOF [Structure and znosotryvkist covers VC-FeCr and VC-FeCrCo, received supersonic flame spraying]. *Fiz.-khim. mekhanika materialiv*, Vol.54, 1, 31–38 [in Ukrainian].
5. Pokhmurs'ka, H.V., Student, M.M., Pokhmurs'kyj, V.I. (2017). Hazotermichni pokryttia [Gas-thermal coatings]. L'viv: “Prostir-M” [in Ukrainian].
6. Hrushhiv, M.M., Babichev, M.A. (1970). Abrazivnoe iznashivanie [Abrasive wear]. Moscow: Nauka [in Russian].
7. Tomashov, N.D., Zhuk, N.P., Titov, V.A., Vedeneva, M.A. (1971). Laboratornye raboty po korrozii i zashchity metallov [Laboratory work on corrosion and metal protection]. Izd-vo “Metallurgiya” [in Russian].

Sergey Markovych, PhD tech. sci

Central'no Ukrainian national technical university, Kropivnizksj, Ukraine

Khrystyna Zadorozhna, post-graduate, **Halyna Veselivska**, PhD tech. Sci., **Volodumir Hvozdet'skyi**, PhD tech. sci, **Yaruna Sirak**, post-graduate, **Yaroslav Koryn'**, engineer

Physico-mechanical institute by G.V.Karpenko of NAS of Ukraine

Structure, Wearproofness That Inoxidizability coverage of VC -FeCr and VC-FeCrCo, Got Supersonic Gas-flame Spray Method HvoF

The wear resistance and corrosion resistance of coatings superimposed with the supersonic gas-flame spray method (HVOF -High Velocity Oxygen Fuel Flame Spraying process, propane-oxygen fuel) have been studied. The coating was sprayed using Diamond Jet Hybrid gun (fuel propane-oxygen) and JP5000 gun (kerosene oxygen). For comparison, the method of plasma spray coating in dynamic vacuum (PSCDV) is used,

which provides the highest quality of gas-thermal coatings. Spray powders are made by mechanical alloyage using a planetary mill. The starting components for this were vanadium carbide powder, ferrochrome and nickel cobalt alloy. It has been established that wear resistance of sprayed coatings by these methods is 75 ... 100 times higher than the bases of D16, 3 ... 5 times higher than steel 100Cr6 (HRC60 for friction with hardened abrasive).

The corrosion and electrochemical properties of coatings in a 3% NaCl solution at a temperature of 20 ± 0.2 °C have been estimated and they have high corrosion strength, which correlates with their porosity. The long-term exposure of coated samples in a 3% NaCl solution leads to the penetration of aggressive media into the interface of the backing coating, which can cause subfilm corrosion and peeling of the coating. It has been established that the highest corrosion resistance has a VC-FeCrCo coating, the porosity of which does not exceed 0.5%, obtained by the plasma method in a dynamic vacuum. Its corrosion currents are 2 times lower compared with the same coating obtained by the HVOF method.

spray, coverage, structure, wearproofness, inoxidizability, supersonic gas-flame spray method, method of plasma spray of coatings in a dynamic vacuum

Одержано (Received) 20.11.2018

Прорецензовано (Reviewed) 22.11.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 631.374:631.362

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.110-117>

В.Л. Куликівський, канд. техн. наук, **В.М. Боровський**, ст. викл., **В.К. Палійчук**, доц., канд. техн. наук

*Житомирський національний агроекологічний університет, м. Житомир, Україна
e-mail: kylikovskiyv@ukr.net*

Транспортування зерна сої гвинтовими робочими органами під час збирання та післязбиральної обробки

Представлено результати експериментальних досліджень технологічного процесу переміщення зерна сої, гвинтовими робочими органами збиральних та очисних машин, які були направлені на визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів транспортерів. Встановлено, що основний вплив на травмування зернового матеріалу транспортером мають зазор між витками і кожухом, частота обертання гвинтового робочого органу та вологість насіння сої.

вологість насіння, гвинтовий робочий орган, зерновий матеріал, параметри, травмування, транспортування, соя

В.Л. Куликовский, канд. техн. наук, **В.Н. Боровский**, ст. преп., **В.К. Палийчук**, доц., канд. техн. наук
Житомирский национальный агроэкологический университет, г. Житомир, Украина

Транспортировка зерна сои винтовыми рабочими органами при уборке и послеуборочной обработке

Представлены результаты экспериментальных исследований технологического процесса перемещения зерна сои, винтовыми рабочими органами уборочных и очистительных машин, которые были направлены на определение рациональных конструктивно-технологических параметров транспортеров. Установлено, что основное влияние на повреждение зернового материала транспортером имеют зазор между витками и кожухом, частота вращения винтового рабочего органа и влажность семян сои.

влажность семян, винтовой рабочий орган, зерновой материал, параметры, повреждение, транспортировка, соя

© В.Л. Куликівський, В.М. Боровський, В.К. Палійчук, 2018

Постановка проблеми. Під час виконання технологічних процесів, сільськогосподарського виробництва, зерно неодноразово піддається ударам, стисканням і тертю, що супроводжується пошкодженням поверхневих та внутрішніх тканин насінин. Післязбиральна обробка включає в себе основні технологічні операції (очищення, сортування, сушіння) і допоміжні (транспортування, розподілення та накопичення).

Нерідко деформація зерна не супроводжується пошкодженням поверхневих шарів насінини. Після зняття навантаження, зернина за рахунок пружних властивостей відновлює свої розміри і зовні здається неушкодженою, хоча внутрішні її тканини травмовані. Зниження посівних якостей насіння пов'язано не стільки з наявністю видимих травм, скільки з пошкодженням внутрішніх тканин зернин при їх деформації, що істотно залежать від вологості матеріалу.

Основною причиною, що викликає пошкодження насіння, є механічна дія робочих органів машин і знарядь під час післязбиральної обробки, сушіння та транспортування. Значна частина травмованого насіння з'являється вже на етапі збирання.

Рівень травмування зерна при збиранні залежить від досконалості конструкції збиральних машин, режимів роботи їх робочих органів, строків і способів збирання та фізико-механічних властивостей зерна в момент обмолоту. З фізико-механічних властивостей зерна сої найбільший вплив на якість насіння має вологість в момент обмолоту, яка залежить від погодних умов під час збирання.

Зерно сої до обробки має 22 % зовнішніх пошкоджень, а після очищення, сортування і сушіння – 55 % ушкоджень. З огляду на той факт, що понад 10% пошкодженого насіння потрапляє у відходи, загальна кількість травмованих зернин потоковою лінією становить 43%. Від загальної кількості пошкоджених насінин більше 50% травмується при вантажно-розвантажувальних і транспортних операціях.

Тому, вирішення наукового завдання, яке полягає у дослідженні, розробці та практичному впровадженні раціональних конструкцій транспортерів із мінімізацією впливу робочих органів на пошкодження насіннєвого матеріалу, є актуальним для сільськогосподарської галузі країни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Встановлено, що в комбайнах джерелами механічного пошкодження насіння є гвинтові транспортери і елеватори, які впливають на утворений після сепарації зерновий потік [1, 2]. Основною причиною механічного пошкодження зерна транспортуючими органами є зношування витка чи порушення зазору між гвинтом і кожухом [3, 4].

При очищенні, сортуванні, сушінні, а також транспортуванні, зерно піддається механічним пошкодженням, в ряді випадків, більшим ніж при обмолоті його комбайнами [5-7]. Картина ускладнюється ще й тим, що з метою підвищення глибини очищення зерно пропускають через очисні машини багаторазово. До того ж, зерно за період зберігання, кілька разів перекачують з силосу в силос. Середній шлях проходження насіння по транспортуючим механізмам становить близько 1500 м.

Постановка завдання. Мета досліджень полягає у встановленні залежності пошкодження зерна сої від параметрів гвинтових транспортерів збиральних та очисних машин. Визначити вплив режимів роботи гвинтових транспортерів на якісні показники насіннєвого матеріалу.

Виклад основного матеріалу. Дослідженнями встановлено, що механічне пошкодження зерна сої при транспортуванні гвинтовими робочими органами залежать

від багатьох факторів, основними з яких є частота обертання шнека, зазор між гвинтом і кожухом, вологість насіннєвого матеріалу.

В більшості горизонтальних і похилих гвинтових транспортерах зернозбиральних комбайнів та зерноочисних машин, згідно технічних характеристик, зазор між витком і кожухом становить 10 мм. Даний параметр (зазор) найбільш змінний в результаті протікання процесів зношування витків зерною масою. Від його величини суттєво залежать основні показники роботи шнека (рис. 1). Особливе значення зазор «виток-кожух» має для шнеків зернозбиральних комбайнів та зерноочисних машин, де від його величини залежить ступінь пошкодження зерна при транспортуванні [8].

На зернину сої в зазорі, коли є ступені вільності її переміщення відносно контактних поверхонь, діють наступні сили: сила ваги зернини; реакція поверхні кожуха; реакція поверхні витка; опір шару сусідніх насінин. Ці сили, в даному випадку, породжують моменти обертового руху насінини при її не защемленні: момент від сили ваги; момент від реакції кожуха; момент від реакції витка; момент від опору сусідніх зернин.

Однак, таке переміщення зернин сої в зазорі, коли є поступальний та обертовий рух представляється типовим для зазорів між кожухом і витком менших, ніж найменший розмір насінин. Тобто, для умов нормального транспортування зерна шнековою поверхнею на границі переходу до нерухомого кожуха. При цьому, зазначені зусилля в основному витрачаються на виконання роботи з переміщення зерна і тільки частково на тертя та спрацювання робочих поверхонь витка і кожуха.

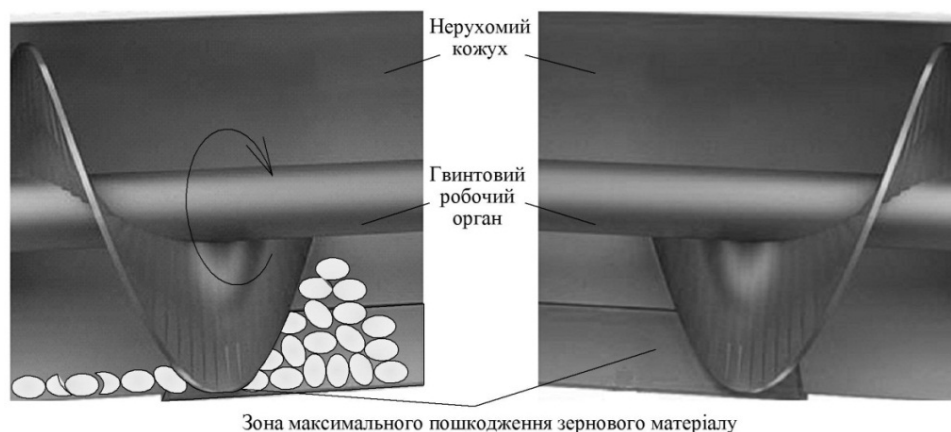


Рисунок 1 – Переміщення зернового матеріалу гвинтовим робочим органом транспортера
Джерело: розроблено автором

Таким чином, спочатку зернина переміщується вздовж осі гвинтового робочого органу, виконуючи складний рух ковзання по поверхнях тертя з прокручуванням навколо власного центра мас. Це може продовжуватися до виникнення умов защемлення зернини в зазорі. А такі умови складаються внаслідок зношування робочої поверхні витка, стирання переднього кута взаємодії з зерною масою і виникнення щілини захвату насінини.

З метою підвищення продуктивності праці при проведенні експериментальних досліджень впливу конструктивно-технологічних параметрів гвинтових транспортерів на пошкодження зерна сої (сорту Артеміда), було використано конструкцію універсального стенду [3]. Його мобільність в циркуляції сипкого матеріалу і розширені технологічні можливості в знятті різних характеристик механізмів

дозволяють проводити випробування гвинтових транспортерів та шнекових живильників зернозбиральних комбайнів і зерноочисних машин. Наявність у робочих органів транспортерів власних окремих приводів дозволяє підвищити надійність стенду та надає можливість незалежного керування швидкістю обертання кожного гвинта.

При визначенні пошкодження насіння, після переміщення гвинтовим робочим органом, зерно потрапляло на спеціальні решета [4], що дозволяли виділити пошкоджені насінини з основного матеріалу. Вологість насіння сої визначали за ДСТУ 4138-2002 [9].

Визначення травмування насіння проводили за методикою фарбування робочих проб зерна по 100 шт., виділених з насіння основної культури, розчином індигокарміну [10]. Через 1-2 хвилини розчин зливали, насіння підсушували на фільтрувальному папері і в кожній пробі підраховували макротравмовані насінини, тобто з видимими неозброєним оком відчленованими частинами насінин та мікротравмовані насінини з пофарбованими тканинами. Вміст макро- і мікротравмованих насінин виражали у відсотках як середнє з двох повторень. До макротравм відносили такі типи ушкоджень: вибита частина сім'ядолей; частково або повністю видалена насіннева оболонка; різні вм'ятини та деформації насіння. Мікротравми, після переміщення гвинтовим робочим органом, візуально не спостерігаються, але завдають великої шкоди насінню сої. До них належать: мікропошкодження сім'ядолей з внутрішніми тріщинами; мікропошкодження оболонок насіння.

На стенді для проведення досліджень встановлювалися серійні шнекові живильники (зерноочисних машин, зернозбиральних комбайнів) та розроблений транспортер [4], особливістю якого є можливість регулювання зазору між гвинтом та кожухом (1...20 мм). Здійснювалося переміщення зернового матеріалу від завантажувального лотка до розвантажувального патрубку (відстань транспортування – 1,5 м), паралельно фіксувалися покази вимірювальних приладів.

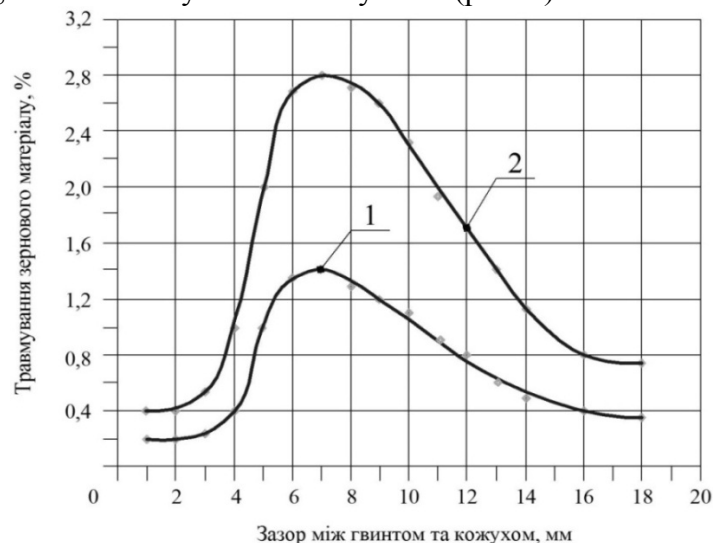
Попередніми дослідженнями визначено [3, 4], що збільшення частоти обертання гвинтового робочого органу призводить до зростання травмування за рахунок інтенсивнішого тертя зерен об поверхні, що контактують та повторних взаємодій з витком.

Проведеними дослідженнями встановлено, що у зазорі «виток-кожух» меншому за мінімальні розміри зерен сої, защемлення їх в процесі переміщення по кожуху практично не спостерігається (частота обертання гвинтового робочого органу транспортера – 200 об/хв.). При досягненні величини зазору 5...10 мм, відбувається інтенсивне зростання пошкодження зерна (рис. 2). У зв'язку з тим, що загальна відстань переміщення зернового матеріалу гвинтовими робочими органами зернозбиральних комбайнів та зерноочисних машин – значна (3...8 м), насіння сої декілька разів пропускали через транспортер випробувального стенда. Дана операція дозволила максимально наблизити експериментальні дослідження гвинтових транспортерів до реальних умов експлуатації.

Збільшення відстані транспортування істотно впливає на пошкодження зернового матеріалу. Під час дворазового пропускання зерна сої через шнек (відстань транспортування становила 3 м), максимальне травмування насіння (при зазорі – 6...8 мм) склало 1,4 % від загальної кількості переміщеного зерна. Збільшення відстані транспортування вдвічі (6 м), призвело до істотного зростання пошкодження зерна, що досягло 2,8 %, при зазорі – 7 мм.

Найпоширеніший вид пошкодження насіння сої, під час дослідження процесу переміщення зернового матеріалу гвинтовими транспортерами – мікро- та макротравмування сім'ядолей. Встановлено, що мікропошкодження насіння сої

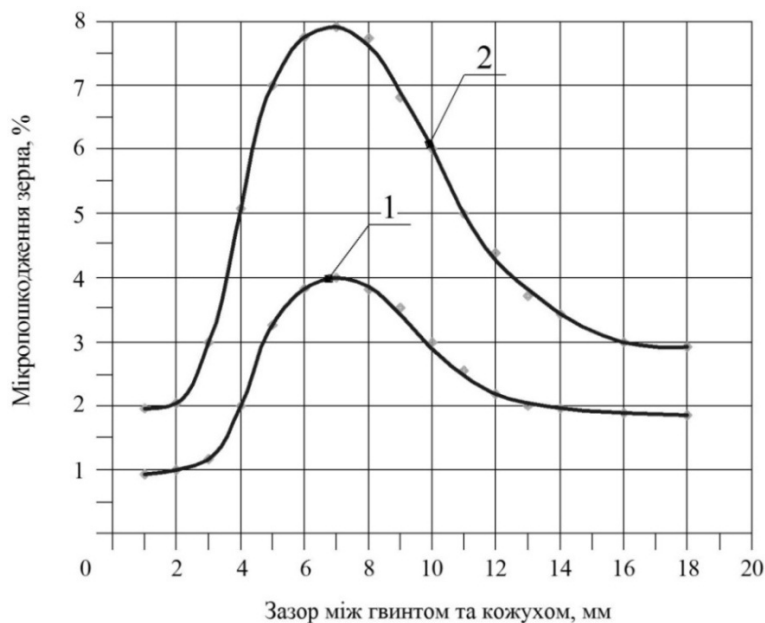
досягають свого максимуму при зазорах між гвинтом та кожухом, близьких до товщини зернини, а потім поступово зменшується (рис. 3).



- 1 – дворазове пропускання матеріалу через шнек (відстань транспортування 3 м);
2 – чотирихразове пропускання матеріалу через шнек (відстань транспортування 6 м)

Рисунок 2 – Травмування зернового матеріалу (соя) в залежності від зазору між гвинтом та кожухом транспортера (при $n=200$ об/хв)

Джерело: розроблено автором



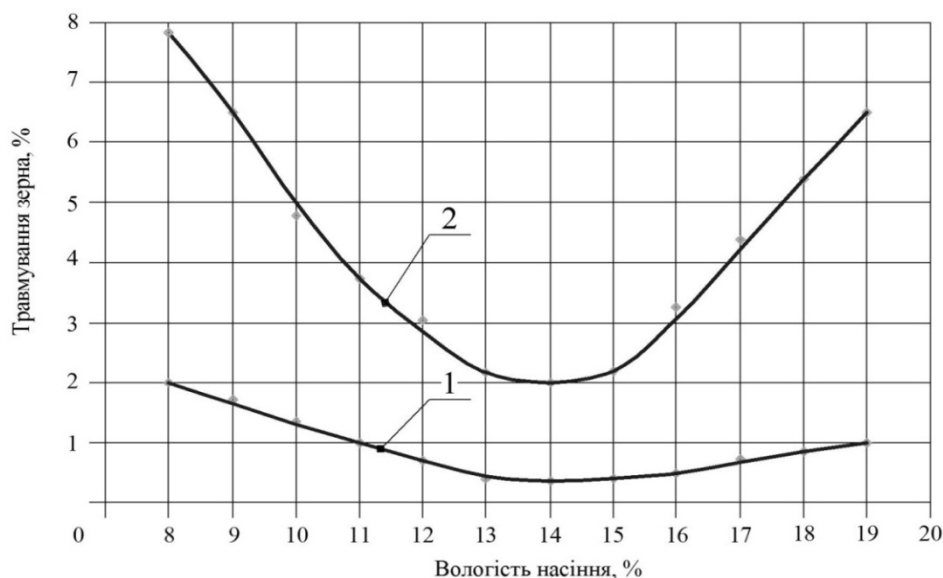
- 1 – дворазове пропускання матеріалу через шнек (відстань транспортування 3 м);
2 – чотирихразове пропускання матеріалу через шнек (відстань транспортування 6 м)

Рисунок 3 – Мікропошкодження зерносої в залежності від зазору між гвинтом та кожухом транспортера

Джерело: розроблено автором

Пошкодження зерна сої, гвинтовими транспортерами, при збиранні залежить від його вологості (рис. 4). При високій вологості матеріалу, гвинтові робочі органи

деформують зернини сої і оболонка насінин відшаровується. Зниження вологості призводить до значного подрібнення зернин робочими органами транспортерів. Оптимальні показники вологості зерна сої, з точки зору утворення макро- та мікропошкоджень гвинтовим транспортером, знаходяться в діапазоні 13...15 %.



1 – макропошкодження зерна; 2 – мікропошкодження зерна

Рисунок 4 – Пошкодження зерна сої гвинтовим робочим органом серійного горизонтального транспортера в залежності від вологості насіння

Джерело: розроблено автором

Експериментальними дослідженнями встановлено, що в складі зернового матеріалу, після переміщення сої гвинтовим транспортером, присутня значна частина половинок насіння. Структурно – сильні половинки з'єднані відносно слабкими зв'язками. Половинки та пошкоджені насінини сої, в порівнянні з цілими зернинами, абсолютно по іншому взаємодіють з навколишнім середовищем – легше вбирають вологу, швидко заселяються мікроорганізмами. Травмовані та розділені зернини сої в 6 разів інтенсивніше «дихають», ніж ціле насіння, що призводить до активного виділення тепла і вологи. Таким чином, даний некондиційний матеріал є ймовірним джерелом самозігрівання зернової маси.

Висновки. 1. Встановлено оптимальну вологість збирання та очищення сої, за якої відбувається найменше травмування насіння гвинтовими робочими органами машин. Вологість насіння в межах 13...15 % сприяла суттєвому зниженню кількості травмованих зернин, під час транспортування.

2. Пошкодження зерна знижує лабораторну схожість насіння сої, яка варіюється в середньому по сортах в межах 80...90 %. Незважаючи на попереджувальні заходи, повністю уникнути травмування насіння шнеками не вдалося. Можливо лише обмежити ступінь пошкодження зерна. З цією метою, під час досліджень транспортерів, змінювали зазори між кожухом і гвинтом та швидкість його обертання. Встановлено, що при зазорі меншому за мінімальні розміри зерен сої, защемлення їх в процесі переміщення по кожуху практично не спостерігається.

3. Використання транспортерів зі встановленим мінімальним зазором між витками і кожухом (1...2 мм) дозволяє зменшити травмування зерна сої до 0,2 %, а

також втричі знизити мікропошкодження насіння гвинтовим робочим органом, при збереженні максимальної продуктивності процесу.

Разом з цим, питання впливу конструктивно-технологічних параметрів гвинтових транспортерів сільськогосподарських машин на травмування насіння зернобобових культур все ще залишається відкритим і подальші дослідження в цьому напрямку є актуальними.

Список літератури

1. Пугачев А.Н. Повреждение зерна машинами. Москва: Машиностроение, 1976. 320 с.
2. Тарасенко А.П. Снижение травмирования семян при уборке и послеуборочной обработке. Воронеж: ФГОУ ВПО ВГАУ, 2003. 331 с.
3. Куликівський В.Л., Палійчук В.К., Боровський В.М. Дослідження процесу травмування зерна гвинтовим конвеєром. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 2016. Вип. 46. С. 160–165.
4. Куликівський В.Л., Палійчук В.К., Боровський В.М. Травмування зернового матеріалу гвинтовими робочими органами шнекових живильників. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 2017. Вип. 47, ч. I. С. 124–131.
5. Мякин В.Н., Урюпин С.Г. Травмирование семян при послеуборочной обработке и пути его снижения. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, 2006. №3. С. 73–75.
6. Оробинский В.И., Шатохин И.В., Парфенов А.Г. Качественные показатели работы зерноочистительного агрегата. *Лесотехнический журнал*, 2014. №3. С. 256–262.
7. Присяжная С.П. Конструктивно-технологические основы развития транспортирующих устройств, обеспечивающих снижение повреждения зерна сои. Благовещенск, 1992. 75 с.
8. Бойко А.І., Куликівський В.Л. Дослідження контактної взаємодії зерна в зазорі «виток-кожух» шнекових живильників зерноочисних машин. *Науковий вісник НУБіПУ. Сер. Техніка та енергетика АПК*, 2011. Вип. 166, ч. 1. С. 267–274.
9. ДСТУ 4138-2002. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. [Чинний від 2004-01-01]. Київ, 2003. 173 с. (Національний стандарт України).
10. Порядок організації насінневого контролю суб'єктами насінництва в Україні/ за ред. М.М. Гаврилюка. Київ: Аграрна наука, 2001. 49 с.

References

1. Pugachev, A.N. (1976). Povrezhdenie zerna mashinami [Damage to grain by machines]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
2. Tarasenko, A.P. (2003). Snizhenie travmirovaniya semjan pri uborke i posle uborochnoj obrabotke [Reduction of seed injury during harvesting and post-harvest treatment]. Voronezh: FGOU VPO VGAU [in Russian].
3. Kulykivs'kyj, V.L., Palijchuk, V.K. & Boroivs'kyj, V.M. (2016). Doslidzhennia protsesu travmuvannia zerna hvyntovym konveierom [Investigation of injuries grain screw conveyor]. *National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*, 46, 160-165 [inUkrainian].
4. Kulykivs'kyj, V.L., Palijchuk, V.K. & Boroivs'kyj, V.M. (2017). Travmuvannia zernovoho materialu hvyntovymy robochymy orhanamy shnekovykh zhyvylynykiv [Damage of grain material by screw working parts of screw feeders]. *National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*, 47, part.I, 124-131 [inUkrainian].
5. Myakin, V.N. & Uryupin, S.G. (2006). Travmirovanie semyan pri posleuborochnoy obrabotke i puti ego snizheniya [Damage to seeds during post-harvest processing and ways to reduce it]. *News of the Orenburg State Agrarian University*, 3, 73-75 [inRussian].
6. Orobinskiy, V.I., Shatohin, I.V. & Parfenov, A.G. (2014). Kachestvennyie pokazateli raboty zernoochistitelnogo agregata [Quality indicators of the operation of the grain cleaning unit]. *Forestry engineering journal*, 3, 256-262 [inRussian].

7. Prisyazhnaya, S.P. (1992) Konstruktivno-tehnologicheskie osnovy i razvitiya transportiruyuschih ustroystv, obespechivayuschih snizhenie povrezhdeniya zerna soi [Structural and technological basis for the development of transporting devices that reduced a mageto soy bean grain] .Blagoveshchensk [in Russian].
8. Bojko, A.I. & Kulykivs'kyj, V.L. (2011). Doslidzhennia kontaktnoi vzaiemodii zerna v zazori «vytok-kozhukh» shnekovykh zhyvyl'nykh zernoochysnykh mashyn [Research of contact co-operation of grain in a gap a «coil-chamfer» of screw feeders of grain cleaners]. *Naukovyj visnyk NUBiPU. Ser. Tekhnika ta enerhetyka APK. – Scientific Herald of NULES of Ukraine. Series: Technique and energy of APK*, 166, part. 1, 267-274 [inUkrainian].
9. Nasinnia silskogospodarskikh kultur. Metodi viznachennya yakosti [The seeds agricultural crops. Methods for determining quality]. (2003). *DSTU 4138-2002 from 1st January, 2004*. Kyiv: Derzhstandart Ukraine [in Ukrainian].
10. Havryliuka, M.M. (Eds.). (2001). Poriadok orhanizatsii nasinnievoho kontroliu subiektamy nasinnystva v Ukraini [The order of the organization of seed control subjects of seed production in Ukraine]. Kyiv: Aharnanauka [inUkrainian].

Vladimir Kulykivskyi, PhD tech. sci., **Victor Borovskyi**, Sr. Lect., **Vladimir Paliychuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Zhytomyr National Agroecological University, Zhytomyr, Ukraine

Transportation of Soybean Grain Screw Working Bodies During Harvesting and Post-harvest Processing

When performing technological processes agricultural production the grain is repeatedly subjected to shocks, compression and friction, which is accompanied by damage to the surface and internal tissues of the seeds. The main cause of damage to the seeds is the mechanical action of the screw working bodies of the machines and tools during post-harvest processing, drying and transportation. A significant portion of damaged seeds appears already at the stage of soybean harvesting. The level of damage to the grain during harvesting depends on the perfection of the design of the harvesting machines, the modes of operation of their working bodies, the timing and methods of harvesting, and the physical and mechanical properties of the grain at the time of displacement.

The purpose of the paper is to determine the dependence of the grain material injury on the parameters of screw feeders and to substantiate their optimal values.

The greatest influence on the damage of grain material carries a gap between the turns of the screw working organ and the screw housing its approximation to the size of the grain particles leads to increased destruction of individual grains. The use of conveyors with a minimum gap between the screw and the housing allows reducing soybean grain damage by up to 0.2% as well as reducing the microscopic damage to seeds threefold while maintaining the maximum productivity of the process. Increasing the travel distance significantly affects the damage to the grain material. During the twofold transmission of soybean grain through a screw conveyor, the maximum damage to the seeds was 1.4 % of the total amount of transported grain. A doubling of the transportation distance led to a significant increase in grain damage, which reached 2.8 %.

Damage to soybean grain by screw conveyors during harvesting depends on its humidity. With a high moisture content of the material, the screw working bodies deform the soybean seeds and the seed coat peels off. The decrease in humidity leads to a significant fragmentation of the grains by the working bodies of the conveyors. The optimal indicators of moisture content of soybean grain, in terms of the formation of macroscopic and microscopic damage to seeds, by a screw conveyor, are in the range of 13...15%.

seed moisture, screw working body, grain material, parameters, damage, transportation, soy

Одержано (Received) 19.11.2018

Прорецензовано (Reviewed) 4.12.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 621.664

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.118-127>

Ю.В. Кулешков, проф., д-р. техн. наук, **Т.В. Руденко**, доц., канд. техн. наук, **М.В. Красота**, доц., канд. техн. наук, **Р.А. Осін**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна

e-mail: krasotamv@ukr.net

Зниження масогабаритних показників шестеренного насоса оптимізацією параметрів зубчатого зачеплення

В статті розглянуті питання зниження маси і габаритів шестеренних насосів шляхом оптимізації параметрів зубчатого зачеплення. Оптимізація проводилась в напрямку підвищення питомих показників насоса: робочого об'єму і подачі. Підвищення питомих показників дозволило знизити габарити вузла насоса, що качає, шляхом зменшення ширини шестерень при збереженні робочого об'єму насоса, що в кінцевому результаті привело до зниження габаритних розмірів і маси зпроектowanego насоса.

шестеренний насос, робоча рідина, зубчасте зачеплення, робочий об'єм насоса, питомий робочий об'єм насоса, синергетичний ефект

Ю.В. Кулешков, проф., д-р. техн. наук, **Т.В. Руденко**, доц., канд. техн. наук, **М.В. Красота**, доц., канд. техн. наук, **Р.А. Осін**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Украина

Снижение масогабаритных показателей шестеренного насоса оптимизацией параметров зубчатого зацепления

В статье рассмотрены вопросы снижения массы и габаритов шестеренных насосов путем оптимизации параметров зубчатого зацепления. Оптимизация проводилась в направлении повышения удельных показателей насоса: рабочего объема и подачи. Повышение удельных показателей позволило снизить габариты качающего узла насоса путем уменьшения ширины шестерён при сохранении рабочего объема насоса, что в конечном результате привело к снижению габаритных размеров и массы спроектированного насоса.

шестеренный насос, рабочая жидкость, зубчатое зацепление, рабочий объем насоса, удельный рабочий объем насоса, синергетический эффект

Постановка проблеми. Шестеренні насоси (НШ) володіють технічним потенціалом, який до кінця не розкритий. Підвищення технічного рівня НШ дозволить збільшити питомі показники насосу, а отже розширити галузь їх використання.

Для розширення галузі використання НШ необхідно проводити удосконалення їх конструкції у напрямку підвищення тиску, надійності, підвищення питомих характеристик, зниження питомої ваги та габаритів. В даній роботі приведено результати досліджень, спрямовані на оптимізацію параметрів зубчатого зачеплення НШ, що дозволило підвищити питомі показники насосу, і, як наслідок, знизити його масогабаритні показники при збереженні функціональних параметрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Моделювання робочих процесів подачі шестеренного насоса виконувалося багатьма дослідниками та викладено в наукових працях [1-18]. В деяких роботах дослідження були спрямовані на підвищення робочого об'єму шестеренного насоса [2-4, 8, 9, 11, 12-18]. Однак, в більшості робіт не було акцентовано увагу саме на підвищенні питомого робочого об'єму насоса.

В той же час, в наших публікаціях [19-22] було встановлено, що підвищення питомого робочого об'єму є перспективним напрямком підвищення технічного рівня НШ. В цих публікаціях була розроблена математична модель, яка детально описує процес подачі робочої рідини в НШ. На основі даної математичної моделі авторами була розроблена методика розрахунку оптимального зубчастого зачеплення НШ.

Оптимізація зубчастого зачеплення НШ дозволила отримати максимальне значення робочого об'єму насоса для заданих умов проектування. При цьому, в якості параметра оптимізації приймався коефіцієнт використання об'єму вінців шестерень [19-22].

Постановка завдання. Мета виконаних досліджень полягає у зниженні масогабаритних показників НШ при збереженні його технічних характеристик та відповідно забезпечення технічного та економічного ефекту.

Викладення основного матеріалу. Коефіцієнт використання об'єму вінців шестерень являє собою відношення робочого об'єму насоса до об'єму, що займають вінці шестерень насоса, тобто

$$K_v = \frac{V_0}{D_e (0,25 \pi D_e + A)}, \quad (1)$$

де V_0 – робочий об'єм насоса, мм³;

D_e – діаметр вершин зубів шестерень, мм;

A – міжосьова відстань, мм.

Графічна інтерпретація коефіцієнта використання об'єму вінців шестерень представлена на рис. 1.

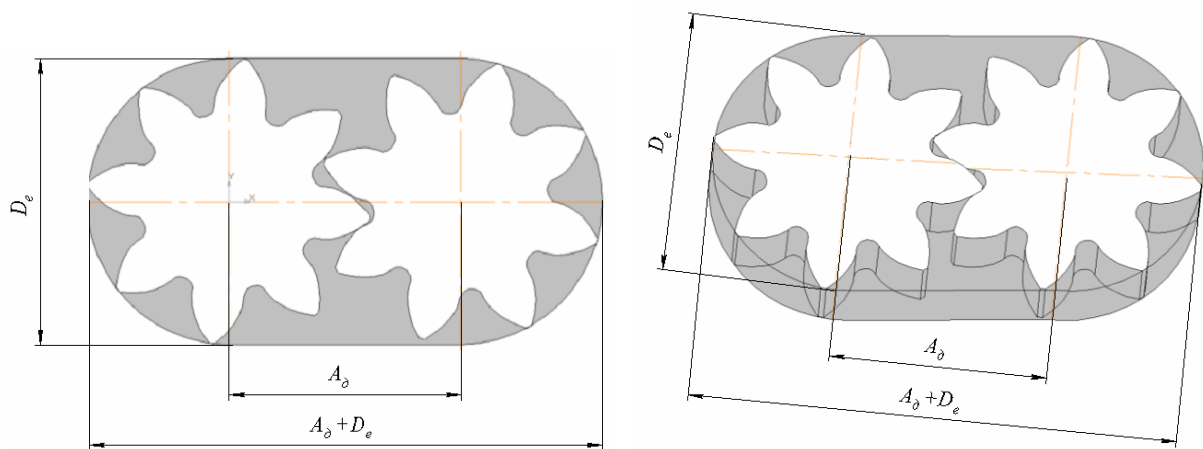


Рисунок 1 – Графічна інтерпретація коефіцієнта використання об'єму вінців шестерень
Джерело: розроблено автором

На рис. 1 видно, що вінці шестерень (не зафарбовані елементи) займають частину простору, який з бічної поверхні обмежується двома циліндричними поверхнями і двома паралельними площинами з боків в зоні міжосьового простору. Об'єм, що займається робочою рідиною (позначений темним кольором) обмежується вінцями шестерень та поверхнями корпусу та кришки насоса.

На рис. 1 видно, що, хоча шестерні і є активними елементами і перекачують робочу рідину з камери всмоктування до камери нагнітання, але вони займають значну частину простору вузла НШ, що качає, і тим самим, визначають об'єм робочої рідини, яка перекачується. З цього витікає, що при зменшенні об'єму, який займають шестерні

у вузлі, що качає, можливо збільшити робочий об'єм насоса не змінюючи габаритних розмірів НШ.

Робочий об'єм насоса можна визначити відповідно до залежності [23, 24]:

$$V_0 = 0,5 \pi \left(D_e^2 - A^2 - \frac{t_0^2}{3} \right), \quad (2)$$

де t_0 – крок зачеплення по основному колу, мм.

З виразу 2 видно, що робочий об'єм залежить від параметрів зубчатого зачеплення шестерень НШ з відповідними обмежуючими умовами, визначає технічний рівень вузла насоса, що качає, та може служити критерієм оптимізації зубчатого зачеплення НШ по подачі.

В результаті оптимізації параметрів зубчатого зачеплення НШ був розрахований, спроектований і виготовлений експериментальний насос НШ-32Е зі збільшеним питомим робочим об'ємом. Розроблена конструкція насоса дозволяє істотно підвищити робочий об'єм і подачу без зміни габаритних розмірів і маси насоса.

Відомо, що підвищення питомих показників приводить до зниження габаритних розмірів і масових характеристик технічної системи при збереженні або навіть збільшенні її експлуатаційних параметрів.

Габаритні розміри експериментального насоса НШ-32Е, спроектованого за запропонованою методикою зі збільшеним питомим робочим об'ємом, залишилися практично без зміни. Але, при цьому коефіцієнт використання об'єму вінців шестерень експериментального насоса зріс до значення 0,3323, що на 11% більше, ніж у серійного насоса, а робочий об'єм досяг значення 36,33 см³, що на 14,6% більше ніж у серійного. Питома потужність, тобто потужність, що припадає на одиницю маси експериментального НШ-32Е, збільшилася на 17% в порівнянні з серійним насосом [19, 21].

Таке істотне збільшення функціональних параметрів експериментального насоса НШ-32Е стало можливим завдяки використанню запропонованої методики розрахунку зубчатого зачеплення з оптимальними параметрами та відповідного проектування НШ.

Шестеренний насос в процесі проектування і виготовлення являє собою відкриту технічну систему. Крім того, відповідно до результатів досліджень викладених у роботі [19, 21] було встановлено, що залежність параметра, який досліджується – коефіцієнта використання об'єму вінців шестерень від параметрів зубчатого зачеплення носить нелінійний характер.

В процесі проектування і виготовлення всі конструктивні параметри НШ є взаємопов'язаними та впливають один на одного. Таким чином, можливо стверджувати, що існують необхідні умови для виникнення синергетичного ефекту.

Після проектування експериментального насоса НШ-32Е зі збільшеним питомим робочим об'ємом було виконано адаптацію його конструкції до умов виробництва.

У світовій практиці з метою підвищення ефективності організації виробництва всі насоси, що виробляються, розбиваються на типорозмірні ряди. В Україні використовують такі типорозмірні ряди: 1, 2, (2,5), 3, 4 і 5. Кожен типорозмірний ряд насосів відрізняється параметрами зубчатого зачеплення. Найбільш масово виробляються насоси 3-го типорозмірного ряду з робочими об'ємами $V_0 = 20 \dots 50$ см³, а серед них виділяється насос з робочим об'ємом $V_0 = 32$ см³. Перехід від одного типорозміру до іншого всередині типорозмірного ряду здійснюють зміною ширини вінця шестерні b .

В процесі оптимізації зубчатого зачеплення вузла, що качає, був отриманий НШ, у якого робочий об'єм становить $V_0 = 36,33 \text{ см}^3$. Для приведення робочого об'єму експериментального НШ до стандартного значення $V_0 = 32 \text{ см}^3$ слід зменшувати ширину шестерні.

Зменшення ширини шестерень, крім зниження робочого об'єму, призводить до зниження навантаження на підшипники ковзання, що створює об'єктивні передумови для зменшення їх довжини, а отже і висоти всього насоса, тобто зменшення габаритів і маси НШ.

Відомо, що підшипники є найважливішими елементами, які в першу чергу відповідають за технічний ресурс НШ. Навантаження на підшипники НШ за визначаються за наступною емпіричною залежністю [8, 9, 10, 23, 24]:

$$F = K p b D_e, \quad (3)$$

де p – тиск, що розвивається насосом, Па;

b – ширина шестерні, м;

D_e – зовнішній діаметр шестерень, м;

$K = 0,75 \dots 0,85$ – коефіцієнт пропорційності.

Існують і інші дані по величині коефіцієнта пропорційності, а саме $K = 0,65 \dots 1,15$. Однак, в літературі відсутні відомості про принципи вибору цього коефіцієнта, а такий великий розкид значень коефіцієнта K пояснюється його експериментальним визначенням для різних типорозмірів насосів. При цьому, відповідно до формули (3) для всіх зубчатих зачеплень незалежно від їх параметрів дається одна і та ж оцінка коефіцієнта пропорційності: $K = 0,85$ [8-10, 23, 24].

Водночас коефіцієнт пропорційності не може дорівнювати одиниці. Це пов'язано з тим, що частина поверхні шестерні, на яку впливають гідравлічні сили, закривається другою шестернею. Іншими словами, коефіцієнт пропорційності K в (3), визначається коефіцієнтом перекриття зубчастого зачеплення НШ.

Пропонується залежність для визначення усередненого навантаження на шестерню, яка б враховувала вплив на це навантаження коефіцієнта перекриття зубчатого зачеплення НШ:

$$F = \frac{p \cdot b \cdot G}{2} = p \cdot b \cdot \frac{A + D_e}{2}, \quad (4)$$

де A – міжосьова відстань, м;

G – довжина більшої осі НШ, м;

D_e – зовнішній діаметр шестерень, м;

b – ширина шестерень, м.

При цьому ступінь впливу коефіцієнта перекриття буде враховуватися автоматично для кожного розглянутого зубчатого зачеплення.

Коефіцієнт перекриття зубчатого зачеплення можливо визначити відповідно до залежності [23, 24]:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{D_e^2 - d_0^2} - A \sin \alpha}{t_0}, \quad (5)$$

де D – зовнішній діаметр шестерень насоса, мм;

d_0 – діаметр основного кола, мм;

A – міжосьова відстань, мм;

α – кут зубчастого зачеплення, град;

t_0 – крок зубчастого зачеплення, мм.

Із залежності (5) міжосьову відстань можливо виразити наступним чином

$$A = \frac{\sqrt{D_e^2 - d_0^2} - \varepsilon \cdot t_0}{\sin \alpha}. \quad (6)$$

Так як крок зубчастого зачеплення визначається як

$$t_0 = m \pi \cos \alpha_0, \quad (7)$$

m – модуль зубчастого зачеплення, мм.

Залежність (6) запишемо у вигляді

$$A = \frac{\sqrt{D_e^2 - d_0^2} - \varepsilon m \pi \cos \alpha_0}{\sin \alpha}, \quad (8)$$

З урахуванням того, що [23, 24]:

$$D_e = \frac{d_0}{\cos \gamma_e}; \quad (9)$$

$$d_0 = m z \cos \alpha_0, \quad (10)$$

де m – модуль зубчастого зачеплення, мм;

z – число зубів шестерень;

γ_e – кут вершини евольвенти профілю зуба, град;

α_0 – кут вихідного контуру, град.

Після нескладних перетворень, отримаємо

$$A = m \cos \alpha_0 \frac{z \operatorname{tg} \gamma_e - \varepsilon \pi}{\sin \alpha}. \quad (11)$$

Зусилля від гідравлічних сил, що впливають на шестерні насоса можна визначити за формулою (4). Тоді, підставивши в (4) вираз (11), після відповідних перетворень з урахуванням (9), отримаємо остаточно

$$F = 0,5 p b \left(m \cos \alpha_0 \frac{z \operatorname{tg} \gamma_e - \varepsilon \pi}{\sin \alpha} + D_e \right), \quad (12)$$

або

$$F = 0,5 p b m z \cos \alpha_0 \left(\frac{\operatorname{tg} \gamma_e - \varepsilon \pi}{\sin \alpha} + \frac{1}{\cos \gamma_e} \right). \quad (13)$$

Розрахувавши навантаження на шестерні насоса НШ-32УК за формулою (3) при $K = 0,85$ і відповідно до отриманої залежності (12) або (13) відповідно, отримаємо:

$$F_1 = 0,85 \cdot 16 \cdot 22 \cdot 55 = 16\,456 \text{ Н};$$

$$F_2 = 16 \cdot 22 \cdot \frac{45 + 55}{2} = 17\,600 \text{ Н}.$$

Як бачимо, з наведених розрахунків, запропонована залежність (12) дає дещо завищену оцінку навантаження (на 6,5%), що запобігає недооцінюванню навантаження шестерень.

З вищевикладеного випливає припущення, що приводячи робочий об'єм експериментального НШ з розрахункового $V_0 = 36,33 \text{ см}^3$ до стандартного $V_0 = 32,0 \text{ см}^3$ шляхом зменшення ширини шестерні з 22 мм до 19 мм можливо очікувати зменшення навантаження на цапфи шестерень, що дасть можливість зменшити їх довжину.

Тиск на цапфи шестерень було запропоновано визначати за формулою:

$$p_{\text{ц}} = \frac{p b (A + D_e)}{4 d_{\text{ц}} L_{\text{ц}}}, \quad (14)$$

де $d_{\text{ц}}$ – діаметр цапф, мм;

$L_{\text{ц}}$ – довжина однієї цапфи, мм.

Результати розрахунків параметрів насоса представлені в табл. 1. Аналізуючи отримані дані бачимо, що при приведенні робочого об'єму експериментального насоса до рівня серійного шляхом зменшення ширини шестерні до 19 мм, навантаження на шестерні, а відповідно і на цапфи шестерень зменшується на 13%. Це дає можливість пропорційно зменшити довжину цапф шестерень, а отже і висоту насоса в цілому.

Таблиця 1 – Основні технічні характеристики адаптованого експериментального НШ 32–Е зі збільшеним питомим робочим об'ємом в порівнянні з серійним насосом

Найменування технічного параметра	Технічні параметри	
	серійного насоса	експериментального насоса
1. Марка шестеренного насоса	НШ-32-3 УК	НШ-32Е
2. Діаметр шестерень, D_e , мм	55,0	56,0
3. Діаметр цапф d_z , мм	25	25
4. Довжина більшої осі $G = A + D_e$, мм	100	101
5. Робочий об'єм насоса V_0 , см^3	31,7	31,7
6. Ширина шестерень b , мм	22,0	19,0
7. Номінальний тиск, МПа	16,0	16,0
8. Довжина цапф сумарна 27 x 2, мм	54	54
9. Навантаження на шестерні, Н	17600	15352
10. Тиск на цапфи шестерень, МПа	13,04	11,37
11. Довжина цапф після коригування їх довжини, сумарна, мм	54	47
12. Тиск на цапфи шестерень після коректування, МПа	13,04	13,07

Джерело: розроблено автором

Зменшення сумарної довжини цапф з 54 мм до 47 мм (табл. 1) дозволяє привести навантаження на цапфи шестерень до значень, що відповідають серійному насосу. Таким чином, завдяки оптимізованим параметрам вдалося зменшити висоту шестерень на 10 мм, а це значить, що висоту кожної втулки можна теж скоротити на 3,5 мм, а висоту корпусу на 10 мм. З цього випливає, що зубчате зачеплення з оптимальними параметрами, що пропонується, дозволяє знизити матеріалоємність, енергоємність і собівартість виготовлення НШ за рахунок зменшення його габаритних розмірів і розмірів його елементів не менше ніж на 10%.

Таким чином, адаптація насосу по робочому об'єму дозволила реалізувати синергетичний ефект, а саме: завдяки збільшенню питомого робочого об'єму стало можливим зменшити ширину шестерень, що дозволило знизити навантаження на цапфи шестерень і, відповідно виникла можливість зменшити їх довжину. Зменшення довжини цапф дозволило істотно знизити як габаритні розміри, так і масу насоса.

Тобто, використання зубчастого зачеплення з оптимальними параметрами дає змогу зменшити ширину шестерні на 3 мм (13,6%), що становить 4,17% від висоти вузла, що качає. Це, в свою чергу, зменшує площу, на яку діють гідравлічні сили, що дозволяє зменшити довжину цапф ще на 7 мм (14%) в сумі на дві цапфи, що становить 9,7% від висоти вузла, що качає. В кінцевому випадку, висоту, що качає, який комплектується шестернями з оптимальними параметрами можливо знизити на 10 мм, (13,89%).

Попередні розрахунки показують, що очікуваний економічний ефект від впровадження запропонованих змін в конструкцію НШ становить 25...40 грн. на один насос. Економічний ефект досягається за рахунок зниження витрат на матеріали і на виготовлення деталей НШ зі зменшеними розмірами: ширини вінця і цапф шестерень, що дозволяє знизити висоту втулок, корпусу і насоса в цілому.

Висновки. В результаті оптимізації параметрів зубчастого зачеплення шестеренного насоса спроектовано конструкцію НШ із підвищеними питомими робочим об'ємом і подачею. При цьому коефіцієнт використання об'єму вінців шестерень експериментального насоса виріс до значення 0,3323, що на 11% більше, ніж у серійного насоса, а робочий об'єм насоса досяг значення 36,33 см³, що на 14,6% більше ніж у серійного насоса.

В процесі адаптації конструкції експериментального насоса зі збільшеним питомим робочим об'ємом до умов виробництва виявили можливість зменшення ширини шестерні при збереженні робочого об'єму насоса, що відповідає стандартним значенням. Це дало можливість знизити навантаження на підшипники насоса, при цьому запропоновано нову залежність для розрахунку навантаження на підшипники насоса, яка визначається коефіцієнтом перекриття зубчастого зачеплення.

У процесі проектування шестеренного насоса з оптимальними параметрами і адаптації його експлуатаційних параметрів до стандартних значень виявили можливість зменшення габаритних розмірів і маси спроектованого насоса.

Розрахунковий річний економічний ефект від впровадження запропонованих змін в конструкцію НШ становить 25...40 грн. в розрахунку на один насос. Економічний ефект досягається за рахунок зниження витрат на матеріали і на виготовлення деталей НШ зі зменшеними розмірами.

Список літератури

1. Прокофьев В.Н. Коловратные роторные насосы: энциклопедический справочник машиностроителя. Машгиз, 1948. Т. 12. С. 398 - 401.
2. Рыбкин Е.А., Усов А.А. Шестеренные насосы для металлорежущих станков. Москва: Машгиз, 1960. 189 с.
3. Леонов А.Е. Насосы гидравлических систем и машин. Москва-Киев: Машгиз, 1960. 226 с.
4. Кудрявцев П.Р. Повышение точности определения теоретической производительности шестеренных насосов. Труды ГОСНИТИ, 1963. Т.2. С. 51 – 68.
5. Кулагин Л.В., Демидов Ю.С., Прокофьев В.Н., Кондаков А.А. Основы теории и конструирования объемных гидропередаточ / под ред. д.т.н., проф. В.Н Прокофьева. Москва: Высшая школа, 1968. 399 с.
6. Осипов А.Ф. Объемные гидравлические машины коловратного типа. Теория, конструкция, проектирование. Москва: Машиностроение, 1971. 207 с.

7. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы / Башта Т.М. и др. Москва: Машиностроение, 1982. 593 с.
8. Башта Т.М. Гидравлические приводы летательных аппаратов. / 4-е изд. Москва: Машиностроение, 1967. 495 с.
9. Башта Т.М. Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем: учебник для вузов. Москва:Машиностроение, 1974. 606 с.
10. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика: справочное пособие. Москва: Машиностроение, 1977. 672 с.
11. Лурье З.Я., Коваленко И.В. Математическая модель качающего узла шестеренного насоса, как объекта многокритериальной оптимизации. *Вибрации в технике и технологиях*, 2003. № 3 (29). С.9-13.
12. The theoretical Flow ripple of an external gear Pump. A Thesis presented lo the Faculty of the Graduate School University of Missouri-Columbia In Partial Fulfillment Of the Requirements for the Degree Master of Science By suresh babu kasaragadda Dr. Noah D. Manring. Thesis Supervisor december 2003.
13. Casoli P., Vacca A., Berta G. L. OPTIMIZATION OF RELEVANT DESIGN PARAMETERS OF EXTERNAL GEAR PUMPS. Department of Industrial Engineering, University of Parma Viale G. P. Usberti 181/A, 43100 Parma, Italy. URL: <http://www.jfps.jp/proceedings/toyama2008/pdf/p1-05.pdf>.
14. Andrea Vacca Projects GearUnits / A. Vacca - Purdue University, 2006. URL: https://engineering.purdue.edu/Maha_AVteam/research%20projects/ProjectsGearUnitsSept16.pdf.
15. Kinematic Displacement Optimization of External Helical Gear Pumps Kuo Jao Huang and Chih Chieh Chen. Department of Mechanical Engineering. *Chung Hua University*. No. 707, Sec.2, Wu-Fu Rd., Hsinchu, Taiwan, 300 R.O.C.
16. A NUMERICAL MODEL FOR THE SIMULATION OF EXTERNAL GEAR PUMPS. Paolo CASOLI, Andrea VACCA and Germano FRANZONI Dipartimento di Ingegneria Industriale Università degli Studi di Parma Parco Area delle Scienze 181/A, 43100 Parma, Italy.
17. P. Casoli, A. Vacca, G.L. Berta. A numerical model for the simulation of flow in hydraulic external gear machines [Tener]: Power Transmission and Motion Control. 2006.-P. 147-165.
18. Andrea V. Modelling and experimental validation of external spur gear machines for fluid power applications / Andrea V., Guidetti M. - MAHA Fluid Power Research Center, Purdue University, West Lafayette, IN, USA, CASAPPA SPA, Cavalli di Collecchio, Parma, Italy – 2011. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X11001018>
19. Черновол М.І., Кулешков Ю.В. Основні напрями вдосконалення шестеренних насосів сільськогосподарської техніки. *Вісник аграрної науки*, 2008. № 8. С. 52 - 54.
20. Кулешков Ю.В., Осин Р.А., Руденко Т.В., Матвиенко А.А. Усовершенствование математической модели мгновенной подачи шестеренного насоса. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту*. Кіровоград: КНТУ. 2008. № 20. С. 380–262.
21. Кулешков Ю.В. Дослідження поведінки математичної моделі питомого робочого об'єму шестеренного насоса типу НШ від параметрів зубчастого зачеплення. / Кулешков Ю.В. та ін. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту*. Кіровоград: КНТУ, 2010. Вип. 23. С. 278 – 390.
22. Кулешков Ю.В., Руденко Т.В. Осин Р.А., Повышение удельной подачи шестеренного насоса. *MOTROL Motorization and Power Industry in Agriculture*. Vol. 11A. Simferopol – Lublin 2009. S.193 – 206.
23. Юдин Е.М. Шестеренные насосы. Основные параметры и их расчет / 2-е изд. перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1964. 236 с.
24. Чиняев И.А. Роторные насосы: справочное пособие. Ленинград.: Машиностроение, 1969. 216 с.

References

1. Prokofev, V.N. (1948). Kolovratnye rotornye nasosy [Rotary rotary pumps]. Moscow: Mashgiz, Vol. 12, 398 - 401. [in Russian].
2. Rybkin, E.A., Usov, A.A.(1960). Shesterennye nasosy dlja metallovezhushhih stankov [Gear pumps for machine tools]. Moscow: Mashgiz [in Russian].
3. Leonov A.E. (1960). Nasosy gidravlicheskih sistem i mashin [Pumps of hydraulic systems and machines]. Moscow - Kiev: Mashgiz [in Russian].
4. Kudrjavcev P.R. (1963). Povysenie tochnosti opredelenija teoreticheskoy proizvoditel'nosti shesterennyh nasosov [Improving the accuracy of determining the theoretical performance of gear pumps]. *Trudy GOSNITI, Vol.2*, 51 – 68 [in Russian].
5. Kulagin, L.V., Demidov, Ju.S., Prokofev, V.N., Kondakov, A.A. (1968). Osnovy teorii i konstruirovaniya

- ob#emnyh gidroperedach [Fundamentals of the theory and design of volumetric hydraulic transmissions]. V.N Prokof'eva (Ed.). Moscow: Vysshaja shkola [in Russian].
6. Osipov, A.F. (1971). Ob#emnye gidravlicheskie mashiny kolovratnogo tipa. Teoriya, konstrukcija, proektirovanie [Volumetric hydraulic machines kolovratnogo type. Theory, construction, design]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
 7. Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B et al. (1982). Gidravlika, gidravlicheskie mashiny i gidravlicheskie privody [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
 8. Bashta, T.M. (1967). Gidravlicheskie privody letatel'nyh apparatov [Aircraft hydraulic drives]. (4-d ed.). Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
 9. Bashta, T.M. (1974). Ob#emnye nasosy i gidravlicheskie dvigateli gidrosistem [Displacement Pumps and Hydraulic Hydraulic Motors]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
 10. Bashta T.M. (1977). Mashinostroitel'naja gidravlika [Engineering hydraulics]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
 11. Lur'e, Z.Ja., Kovalenko, I.V. (2003). Matematicheskaja model' kachajushhego uzla shesterennogo nasosa, kak ob#ekta mnogokriterial'noj optimizacii [Mathematical model of a pumping unit of a gear pump as an object of multi-criteria optimization]. *Vibracii v tehnikе i tehnologijah*, 3 (29), 9-13.[in Russian].
 12. The theoretical Flow ripple of an external gear Pump. A Thesis presented lo the Faculty of the Graduate School University of Missouri-Columbia In Partial Fulfillment Of the Requirements for the Degree Master of Science By Suresh Babu Kasaragadda Dr. Noah D. Manring. Thesis Supervisor December 2003. [in English].
 13. Casoli, P., Vacca, A., Berta, G. L. Optimization of Relevant Design Parameters of External Gear Pumps. Department of Industrial Engineering, University of Parma Viale G. P. Usberti 181/A, 43100 Parma, Italy Retrieved from <http://www.jfps.jp/proceedings/toyama2008/pdf/p1-05.pdf> [in English].
 14. Andrea Vacca Projects GearUnits / A. Vacca - Purdue University, 2006. *engineering.purdue.edu*. Retrieved from https://engineering.purdue.edu/Maha_AVteam/research%20projects/ProjectsGearUnitsSept16.pdf. [in English].
 15. Kinematic Displacement Optimization of External Helical Gear Pumps Kuo Jao Huang and Chih Chieh Chen. Department of Mechanical Engineering, Chung Hua University No. 707, Sec.2, Wu-Fu Rd., Hsinchu, Taiwan, 300 R.O.C. [in English].
 16. A Numerical Model for the Simulation of External Gear Pumps. Paolo Casoli, Andrea Vacca and Germano Franzoni Dipartimento di Ingegneria Industriale Università degli Studi di Parma Parco Area delle Scienze 181/A, 43100 Parma, Italy. [in English].
 17. P. Casoli, A. Vacca, G.L. Berta. A numerical model for the simulation of flow in hydraulic external gear machines [Tener]: Power Transmission and Motion Control. 2006.-P. 147-165. [in English].
 18. Andrea V. Modelling and experimental validation of external spur gear machines for fluid power applications / Andrea V., Guidetti M. - MAHA Fluid Power Research Center, Purdue University, West Lafayette, IN, USA, CASAPPA SPA, Cavalli di Collecchio, Parma, Italy – 2011. Режим доступа к работе: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X11001018> [in English].
 19. Chernovol, M.I., Kulieshkov, Yu.V. (2008). Osnovni napriamy vdoskonalennia shesterennykh nasosiv sil'skohospodars'koi tekhniki [Main directions of improvement of gear wheels of agricultural machinery]. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 8, 52 – 54 [in Ukrainian].
 20. Kuleshkov Ju.V., Osin R.A., Rudenko T.V., Matvienko A.A. (2008). Uovershenstvovanie matematicheskoi modeli mgnovennoj podachi shesterennogo nasosa [Improving the mathematical model of the instantaneous gear pump]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia, Vol. 20*, 253–262. [in Russian].
 21. Kuleshkov, Yu.V., Chernovol, M.I., Rudenko, T.V. Hutsul, V.I., Osin, R.A. (2010). Doslidzhennia povedinky matematychnoi modeli pytomoho robochoho ob'iemu shesterennogo nasosa typu NSh vid parametriv zubchastoho zacheplennia [Investigation of the behavior of mathematical models of specific working volume gear pump type on the parameters of NSh gear]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia, Vol. 23*, 380 – 390 [in Ukrainian].
 22. Kuleshkov, Ju.V., Rudenko, T.V. Osin, R.A., (2009). Povyshenie udel'noj podachi shesterennogo nasosa [Increase specific gear pump feed]. *MOTROL Motorization and Power Industry in Agriculture, Vol. 11A*, 193 – 206 [in Russian].
 23. Judin, E.M. (1964). Shesterennye nasosy. Osnovnye parametry i ih raschet [Gear pumps. Basic parameters and their calculation]. (2d ed.). Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
 24. Chinjaev I.A. (1969). Rotornye nasosy [Rotary pumps] . L.: Mashinostroenie [in Russian].

Yuriy Kuleshkov, Prof., DSc., **Timofey Rudenko**, Assoc. Prof., Phd tech. sci., **Mikhail Krasota**, Assoc. Prof., Phd tech. sci., **Ruslan Osin**, Assoc. Prof., Phd tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Decreasing of Mass and Dimensions Gear Pump Parameters by Optimizing Gear-tooth System Parameters

The object of the completed research is reducing mass and dimensions parameters of gear pump with saving of its technical characteristics and realization technical and economical effect.

As the result of the optimization gear-tooth system parameters of gear pump, the construction of gear pump with increased specific working volume and output was designed.

In the process of adapting the construction of an experimental pump with increased specific working volume to the production conditions, the possibility of decreasing of the gear width with keeping specific working volume, which corresponds to the standard value, was set. This made it possible to reduce the load on the pump bearings, with an offer of new dependence for calculating of the load on the pump bearing, which is determined by the gear-tooth system overlap coefficient.

In the process of designing a gear pump with optimal parameters and the adaptation to its operating parameters to standard values, was found the possibility of reducing the dimensions and mass of the designed pump.

gear pump, hydraulic oil, toothings, swept volume, megascopic specific volume, synergistic effect

Одержано (Received) 12.12.2018

Прорецензовано (Reviewed) 17.12.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 621.9.048.4

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.127-134>

О.Ф. Сіса, доц., канд. техн. наук, **В.В. Пукалов**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Юр'єв**, асп.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: sisaoleh@gmail.com

Розмірна обробка електричною дугою бічної поверхні зносостійкого інструменту

Виконано обґрунтування технологічної схеми формоутворення зовнішньої бічної поверхні пуансону, способом розмірної обробки електричною дугою з урахуванням особливостей фізичних механізмів їх утворення та гідродинамічних явищ в міжелектродному проміжку. Встановлені аналітичні зв'язки технологічних характеристик процесу розмірної обробки електричною дугою твердого сплаву ВК8 з режимами обробки і геометричними параметрами.

електрична дуга, пуансон, твердий сплав, інструмент, технологія, обладнання

О.Ф. Сиса, доц., канд. техн. наук, **В.В. Пукалов**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Юрьев**, асп.

Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Размерная обработка электрической дугой боковой поверхности износостойкого инструмента

Выполнено обоснование технологической схемы формообразования внешней боковой поверхности пуансона, способом размерной обработки электрической дугой с учетом особенностей физического механизма образования и гидродинамических явлений в межэлектродном промежутке. Установлены аналитические связи технологических характеристик процесса размерной обработки электрической дугой твердого сплава ВК8 с режимами обработки и геометрическими параметрами.

электрическая дуга, пуансон, твёрдый сплав, инструмент, технология, оборудование

© О.Ф. Сіса, В.В. Пукалов, В.В. Юр'єв, 2018

Постановка проблеми. Підвищення продуктивності процесу штампування листових деталей з застосуванням штампового оснащення і пресового обладнання є головною метою виробництва сільськогосподарської техніки. Однак при цьому залишається проблема стійкості штампового інструменту, так як це визначає собівартість і якість штампованих деталей, а також точність їх виготовлення. Підвищення стійкості забезпечує приріст продуктивності праці і культури виробництва у холодноштампувальних цехах. Працездатність штампів залежить від вибору матеріалу і розмірів їх робочих деталей. Проблема стійкості штампового інструменту вирішується шляхом виготовлення інструменту з міцних і зносостійких матеріалів з застосуванням карбіду вольфраму [1]. Твердосплавні заготовки матриць і пуансонів спікають і піддають чистовій обробці алмазними абразивними інструментами. Проблема зумовлена, необхідністю знімання доволі великого припуску (до 2 мм) важкооброблюваного композиційного матеріалу, що має підвищену твердість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним направленням підвищення зносостійкості поверхневих шарів є нанесення високоміцних зносостійких матеріалів, або застосування твердих сплавів. З метою підвищення періоду стійкості штампів для вирубування з листового матеріалу необхідно застосовувати міцні зносостійкі твердосплавні матеріали. Завдяки високій міцності, жорсткості і зносостійкості все більше застосування знаходять суцільні твердосплавні осьові пуансони. Виготовляють пуансони з циліндричних твердосплавних стрижнів діаметром 2...20 мм і більше – шліфуванням. Матеріали стрижнів – одно карбідні тверді сплави з розміром зерна карбіду вольфраму менше 1 мкм, вмістом 8...25% кобальтової зв'язки. Виготовляють твердосплавні стрижні методом пресування з твердосплавного порошку і спіканням у вакуумно-компресійній печі. При спіканні стрижня відбувається усадження, що супроводжується коробленням. При цьому вигин стрижня довжиною до 310...330 мм може досягати до 0,35 мм і більше.

Особливе значення в машинобудуванні мають ефективні технології механічної обробки важкооброблюваних матеріалів. Оброблюваність твердого сплаву [2] більш низька в порівнянні з обробкою жароміцних і титанових сплавів. В дійсний час одним з найбільш прогресивних способів обробки твердих сплавів є алмазне шліфування. Шліфування – динамічний процес фізико-хімічного впливу на поверхневий шар деталі з термопружнопластичними деформаціями [3]. Однак знижене шліфування в порівнянні зі сталями виявляється при обробці алмазними кругами, наприклад, на бакелітовій і на металевій зв'язці в умовах звичайного електролітичного шліфування. Це обумовлюється у великій напруженості процесу (зусиллях, температурах, питомої роботи шліфування), у підвищеній відносній витраті, а також недостатньої поновлюваності рельєфу.

Шліфування стрижнів виконують на безцентровошліфувальних верстатах. Перед шліфуванням твердосплавні стрижні перевіряють на кривизну. Кривизна яка дозволяється для стрижнів довжиною до 100 мм – 0,15мм, а довжиною 310...330 мм – 0,25 мм, для запобігання ламання стрижнів на прохід за наявності кривизни і великого припуску. У процесі шліфування припуск видаляють поступово, зніманням по 0,05 мм на один прохід, а на всіх проміжних – 0,1 мм [2]. Твердосплавні стрижні збільшеного вигину відбраковуються і йдуть на переробку, а тому проблема ще більш загострюється і потребує застосування альтернативних технологій які дозволять обробляти скривлені стрижні.

При виконанні механічної обробки твердосплавних заготовок пуансонів, окрім поліпшення обробки, необхідно вирішувати дві задачі:

- швидко продуктивне видалення великих припусків, яке визвано нерівностями і похибками форми після спікання твердосплавних заготовок;
- швидке підвищення точності і якості обробки поверхонь на чистових операціях після чорнових.

Шліфування включає дві технологічні операції: попередню (чорнову) обробку з застосуванням інструменту форми 1A1 високоміцних марок алмазів марок AC15 або AC20 зернистістю 250/200 і шліфуванням на глибину $t=0,2...0,3$ мм; кінцеву (чистову) обробку з застосуванням інструменту із алмазів марки AC6 зернистістю 125/100 і шліфуванням на глибину $t=0,05...0,1$ мм. Зі зміною хвилястості робочого профілю круга і затупленням абразивних зерен змінюється деформування зовнішньої бічної поверхні пуансона, що впливає на інтенсивність теплоутворення і розвиток дифузійних окислювальних процесів. З підвищенням температури збільшується швидкість структурних змін і рухомість дислокацій. На заключних операціях механічної обробки при шліфуванні не тільки втрачається ефект зміцнення поверхневого шару, але і виникають додаткові дефекти (тріщини, прожоги і т.п.), які є джерелом руйнування деталей.

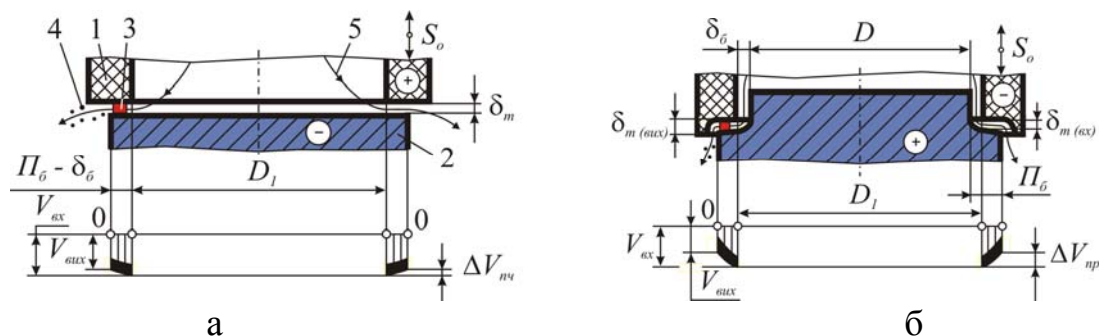
Одним з шляхів зниження трудомісткості, збільшення продуктивності і усунення недоліків є застосування електрофізичних, або електрохімічних способів обробки, що дозволяє підвищити якість обробки, збільшити стійкість деталі, значно розширити можливості обробки. Тому необхідно виготовляти зовнішній контур бічної поверхні пуансона, застосовуючи технології які будуть альтернативними обробці різанням.

За роботами [4,5,6,7,8] відомий спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД), при якому енергія підводиться в зону обробки безперервно. Завдяки цьому, а також тому, що спосіб дозволяє вводити в зону обробки великі потужності електричного струму, даний спосіб володіє високою продуктивністю обробки. Так, за даними роботи [5] продуктивність обробки круглого отвору діаметром 30 мм (площа обробки 706 мм^2) в матеріалі сталь 45 при силі струму $I=1000\text{А}$, досягає $27300 \text{ мм}^3/\text{хв}$ при $Ra = 6,3$ мкм та глибині зони термічного впливу в межах кількох сотих долей міліметра. Однак, впровадження у виробництво процесу РОД твердосплавних пуансонів та виготовлення їх з викривлених стержневих заготовок стримується відсутністю експериментальних даних про взаємозв'язок технологічних характеристик даного процесу з електричним і електродинамічним режимами обробки та геометричними параметрами зовнішньої бічної поверхні, яка оброблюється. Проблема ще більш загострюється при отриманні бічної поверхні з визначеною шорсткістю та механічними властивостями. Тому розробка технології і обладнання способу РОД для отримання зовнішньої бічної поверхні твердосплавних пуансонів є актуальною.

Постановка завдання. Таким чином, метою досліджень є розробка технології та обладнання способу РОД твердосплавних пуансонів, як високоефективної альтернативи традиційним способам їх обробки.

Виклад основного матеріалу. В якості технологічної схеми формоутворення вибрана схема за принципом прошивання-копіювання. Обробку здійснювали з використанням графітового електрода-інструмента (ЕІ, марка МПГ-7) при вибраній технологічній схемі формоутворення з прокачуванням органічного середовища в торцевому міжелектродному зазорі (МЕЗ) під технологічним тиском, за напрямком від перефірії до центру електрода-інструмента (рис.1). Предметом дослідження були такі технологічні характеристики: продуктивність обробки M , $\text{мм}^3/\text{хв}$; питома продуктивність обробки M_a , $\text{мм}^3/\text{А}\cdot\text{хв}$; питома витрата електроенергії a , $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{кг}$; бічний зовнішній МЕЗ δ , мм; відносний лінійний знос ЕІ γ , %; шорсткість обробленої

поверхні Ra , мкм. Будування математичних моделей технологічних характеристик процесу РОД сплаву реліт здійснювалось з застосуванням математичних методів планування експериментів, зокрема плану 2^{4-1} . На підставі апріорної інформації були відібрані фактори, що визначають режими обробки (сила технологічного струму I , А; статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор P_{cm} , МПа) та фактори, що визначають геометричні параметри обробки (площа обробки F , мм²; напруга горіння електричної дуги U , В).



а – початкова фаза обробки; б – проміжна фаза обробки (1 – графітовий ЕІ; 2 – заготовка; 3 – електрична дуга; 4 – продукти ерозії; 5 – гідродинамічний потік)

Рисунок 1 – Технологічна схема формоутворення та епюри швидкостей потоку в торцевому МЕЗ
Джерело: розроблено автором

Усі фактори задовольняють умови керованості, операціональності та однозначності. Інші параметри процесу РОД були зафіксовані на постійному рівні: робоча рідина – органічне середовище; полярність обробки – пряма; матеріал електрода-інструмента – електроерозійний графіт марки МПГ-7.

Таблиця 1 – Поліноміальні математичні моделі технологічних характеристик процесу РОД зразків наплавлених релітом

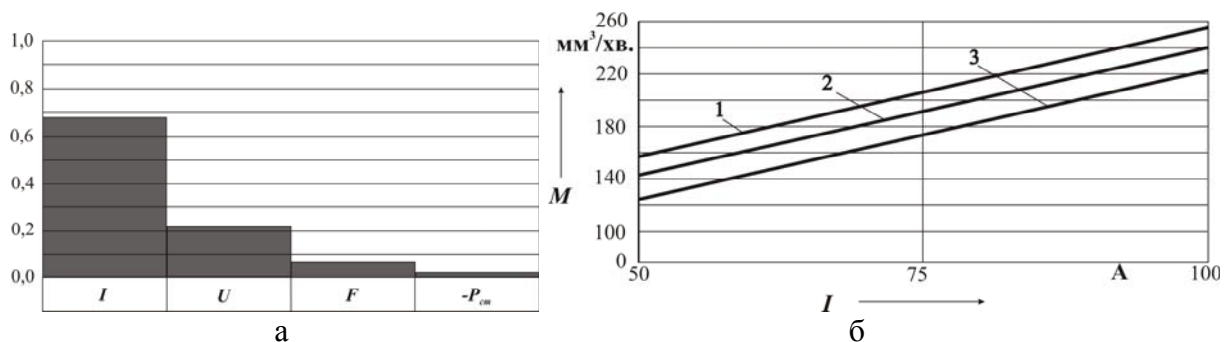
Математична модель	Масштабні співвідношення факторів
Уніполярна РОД бічної поверхні зразка за формулою «графітовий ЕІ – твердий сплав» з використанням способу прямого прокачування	
$M = 192 + 49x_1 + 15x_4 + 6x_3 - 0,5x_2$	$x_1 = (X_1 - 75) / 25$ $x_2 = (X_2 - 1,25) / 0,25$ $x_3 = (X_3 - 76) / 30$ $x_4 = (X_4 - 30) / 5$
$M_a = 2,6 - 0,23x_1 - 0,18x_2 - 0,13x_3 + 0,05x_4$	
$a = 13,23 + 1,45x_1 + 0,8x_4 + 0,75x_2 - 0,7x_3$	
$R_a = 22,6 + 2,6x_1 - 2,4x_3 + 1,1x_2 + 1,1x_4$	
$\delta_{\delta} = 0,053 + 0,027x_3 - 0,011x_2 - 0,005x_4 - 0,0044x_1$	
$\gamma_{.a} = 10,01 - 0,29x_1 - 0,19x_4 - 0,16x_3 - 0,063x_2$	
де: $X_1 \rightarrow I, \text{ А}; X_2 \rightarrow P_{cm}, \text{ МПа}; X_3 \rightarrow F, \text{ мм}^2; X_4 \rightarrow U, \text{ В}$	

Джерело: розроблено автором

В рамках експерименту: продуктивність M процесу РОД сплаву ВК8 змінювалась в межах від 110 до 358 мм³/хв.; питома продуктивність обробки M_a – від

1,7 до 4,3 мм³/А·хв; питома витрата електроенергії а – 6,6 до 17,3 кВт·год/кг; шорсткість обробленої поверхні Ra – 16 до 30 мкм; бічний зовнішній МЕЗ δ – 0,015 до 0,1мм; відносний лінійний знос EI γ – 7,9 до 12,2 %.

Із аналізу моделі (рис. 2) випливає, що на продуктивність обробки M найбільш впливає сила технологічного струму, із підвищенням якої продуктивність збільшується. Отже силу струму слід визначити головним керуючим фактором, а даний факт свідчить про теплову природу процесу РОД. Вплив напруги горіння електричної дуги U приблизно у 3,1 рази менше в порівнянні з силою технологічного струму I , але має істотне значення, з підвищенням U продуктивність обробки M збільшується. Останнє пояснюється зростанням температури електричної дуги у зв'язку зі стисненням її більш динамічним потоком робочої рідини. Вплив площі обробки F на продуктивність обробки M має значення, з підвищенням F продуктивність M підвищується. Вплив статичного тиску $P_{ст}$ робочої рідини на вході потоку у міжелектродний зазор на продуктивність обробки M значно менший, але має суттєве значення, з його підвищенням продуктивність буде зменшуватись. Це дозволяє застосовувати спосіб РОД для обробки твердосплавних пуансонів.

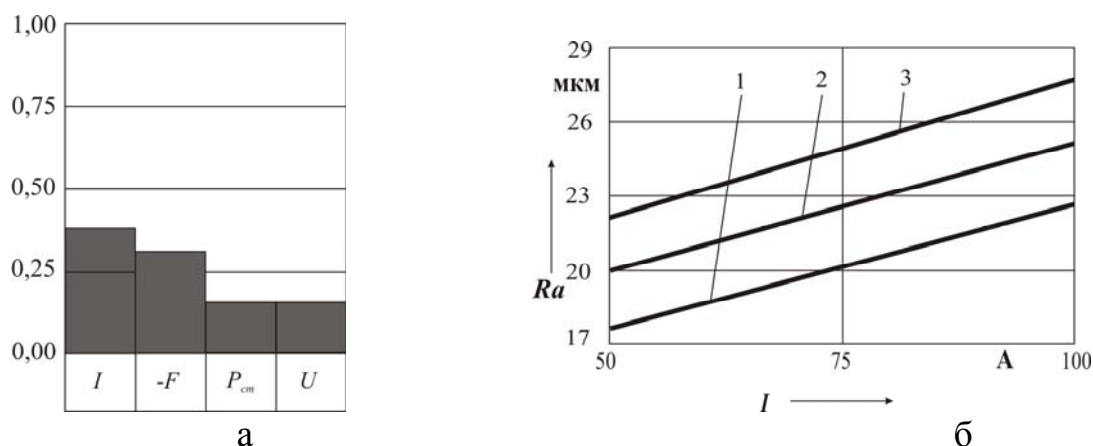


а – ступінь впливу змінних факторів; б – залежність M від I ; 1 – $U = 35$ В;
2 – $U = 30$ В; 3 – $U = 25$ В

Рисунок 2 – Продуктивність M РОД бічної поверхні зразка за формулою “графітовий ЕІ- твердий сплав” з використанням способу прямого прокачування

Джерело: розроблено автором

Із моделі та рис. 3 виходить, що шорсткість обробленої поверхні Ra в повній мірі визначається силою технологічного струму I (ступінь впливу – 37,5 %) та залежить від площі обробки F з підвищенням якої шорсткість поверхні зменшується, а також від статичного тиску $P_{ст}$, напруги горіння електричної дуги U . Із підвищенням I шорсткість поверхні підвищується. Отже, сила технологічного струму I по відношенню до шорсткості обробленої поверхні Ra є головним керуючим фактором. Встановлено, що шорсткість бічної поверхні в умовах РОД представляє сукупність накладення великої кількості лунок (рис. 5, б), діаметр яких, та глибина визначаються силою технологічного струму, з підвищенням якого вони зростають. Причому, чим менша сила технологічного струму, тим більша імовірність утворення лунок. При виконаних експериментальних дослідженнях шорсткість вимірювалася на периферійній частині торцевої поверхні зразка. В умовах експерименту вона змінювалася у межах від Ra – 16 до 30 мкм. За результатами металографічних досліджень мікротріщин у поверхневому шарі зразка після РОД не виявлено.



а – ступінь впливу змінних факторів; б – залежність Ra від I ; 1 – $F = 106 \text{ mm}^2$;
2 – $F = 76 \text{ mm}^2$; 3 – $F = 46 \text{ mm}^2$

Рисунок 3 – Шорсткість обробленої поверхні Ra РОД бічної поверхні зразка за формулою “графітовий ЕІ- твердий сплав ” з використанням способу прямого прокачування
Джерело: розроблено автором



а – обробка твердосплавної заготовки пуансона на електроерозійному верстаті моделі "Дуга-8Г" графітовим ЕІ ($I = 125 \text{ A}$, $P_{cm} = 1,5 \text{ МПа}$, $F = 46 \text{ mm}^2$, $U = 25 \text{ В}$);
б – мікроструктура (x500) поверхневого шару сплаву ВК8 після РОД бічної поверхні зразка графітовим ЕІ ($I = 125 \text{ A}$, $P_{cm} = 1,5 \text{ МПа}$, $F = 46 \text{ mm}^2$, $U = 25 \text{ В}$)

Рисунок 4 – Випробування способу РОД твердосплавного пуансону
Джерело: розроблено автором

Обробку бічної поверхні заготовки твердосплавного пуансона (рис 4, а), здійснювали графітовим ЕІ марки МПГ-7 при наступному режимі обробки: сила технологічного струму $I = 125 \text{ A}$, напруга на дузі $U = 25 \text{ В}$, статичний тиск органічної робочої рідини на вході потоку в міжелектродний зазор $P_{cm} = 1,5 \text{ МПа}$, площа обробки $F = 46 \text{ mm}^2$, полярність обробки пряма (заготовка «мінус»), спосіб прокачування рідини крізь торцевий міжелектродний зазор – пряма (від центра до периферії отвору заготовки). В результаті обробки заготовки твердосплавного пуансона, була зафіксована продуктивність обробки $M = 167 \text{ mm}^3/\text{хв.}$, що в 1,5...1,8 разів перевищує продуктивність без центрального шліфування алмазними кругами твердого сплаву ВК8.

Висновки. В результаті аналізу сучасних методів обробки твердосплавних пуансонів показано, що найбільш продуктивним, є спосіб РОД в умовах уніполярного режиму. Шляхом математичного моделювання, встановлено аналітичні зв'язки та досліджено вплив фізико-технологічних факторів, що обумовлюють режим обробки (силу струму, статичний тиск рідини, напругу горіння електричної дуги) та геометричні параметри (площа обробки) на технологічні характеристики процесу. Отримані моделі дозволяють керувати продуктивністю та питомою продуктивністю обробки, питомою витратою електроенергії, якістю та точністю обробленої поверхні, прогнозувати та оптимізувати дані характеристики.

Таким чином, експериментально доведена доцільність використання способу РОД для високопродуктивної обробки твердосплавних пуансонів, що вимагає відповідно невеликих капіталовкладень в обладнання і технологію, забезпечить швидку окупність за рахунок значного збільшення строку служби пуансонів, призведе до помітної економії коштів на будь-якому виробництві з виготовлення твердосплавних пуансонів.

Список літератури

1. Roebuck, B. and Almond, E.A. Deformation and fracture processes and the physical metallurgy of WC/Co hardmetals. *International Materials Reviews*, 1988. 32(2), pp. 90–110.
2. Hegeman, J. B. J. W., de Hosson, J. T. M., & de With, G. (2001). Grinding of WC-Co hardmetals. *Wear*, 248(1-2), 187–196. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00561-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00561-5)
3. Yang, J., Oden, M., Johansson-Jösaar, M.P., Llanes, L. Grinding effects on surface integrity and mechanical strength of WC-Co cemented carbides. *"Procedia CIRP"*, 2014, vol. 13, 257–263.
4. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов электрической дугой. *Электронная обработка материалов*. 2005. № 1. С. 8–17.
5. Боков В.М. Сіса О.Ф., Мирзак В.Я. Механізм формоутворення плоских поверхностей електричною дугою. *Електронна обробка матеріалів*. 2018. Т. 54 (3). С. 53–63. DOI: 10.5281/zenodo.1297935
6. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою. Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс-ЛТД», 2002. 300 с.
7. Боков В. М. Сіса. О.Ф. Оброблюваність матеріалів електричною дугою: монографія. Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс – ЛТД», 2013. 172 с.
8. Сіса О. Ф. Розмірна обробка електричною дугою бічної поверхні твердосплавного прокатного валка. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.*, 2014. Вип. 44. С. 153–159.

References

1. Roebuck, B. and Almond, E.A. (1988). Deformation and fracture processes and the physical metallurgy of WC/Co hardmetals. *International Materials Reviews*, 32(2), 90–110 [in English].
2. Hegeman, J. B. J. W., de Hosson, J. T. M., & de With, G. (2001). Grinding of WC-Co hardmetals. *Wear*, 248(1-2), 187–196. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00561-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00561-5) [in English].
3. Yang, J., Oden, M., Johansson-Jösaar, M.P., Llanes, L. (2014). Grinding effects on surface integrity and mechanical strength of WC-Co cemented carbides. *"Procedia CIRP"*, Vol. 13, 257–263 [in English].
4. Nosulenko, V. I. (2005). Razmernaya obrabotka metallov elektricheskoy dugoy [Dimensional treatment of metals by electric arc]. *Elektronnaya obrabotka materialov – Electronic material processing*, 1, 8–17 [in Russian].
5. Bokov, V.M., Sisa, O.F. & Mirzak V.Ya. (2018). Mekhanizm formoobrazovaniya ploskikh poverkhnostey elektricheskoy dugoy [Mechanism for the formation of plane surfaces by electric arc]. *Elektronnaya obrabotka materialov – Electronic material processing*, Vol. 54 (3), 53–63. DOI: 10.5281/zenodo.1297935 [in Russian].
6. Bokov, V.M. (2002). *Rozmirne formoutvorennja poverkhonj elektrychnoju dugoju [Dimensional shaping of surfaces by electric arc]*. Kirovograd: Polighrafichno-vydavnychyj centr TOV «Imeks-LTD» [in Ukrainian].

7. Bokov, V.M. & Sisa, O.F. (2013). *Obroblyvanistj materialiv elektrychnoju dughoju: monohrafija [Machining of materials by electric arc]*. Kirovograd: Polighrafichno-vydavnychyj centr TOV «Imeks – LTD» [in Ukrainian].
8. Sisa, O. F. (2014). Rozmirna obrobka elektrychnoju dughoju bichnoji poverkhni tverdosplavnogho prokatnogho valka [The dimensional processing of hard-alloy forming roll side surface by the electric arc]. *Zaghaljnoderzhavnyj mizhvidomchyj naukovy-tekhnichnyj zbirnyk. Konstruvannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija siljskoghospodarsjkykh mashyn – National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*, 44, 153–159 [in Ukrainian].

Oleh Sisa, Assoc. PhD tech. sci., **Viktor Pukalov**, Assoc. PhD tech. sci., **Vasiliy Yuryev**, post-graduate
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Dimensional Sizing of Lateral Surface of Wearproof Tool by Electrical Arc

The article is devoted to development of the technology and equipment for rough machining of hard-face puncheon's lateral surface with electrical arc as a highly efficient alternative to the conventional methods of rough machining.

In order to extend the durability period of the sheet material blanking die, the strong wearproof materials should be used. The hard-face axial puncheons are used due to high strength, hardness and wearproofness. The puncheons are made of the cylindrical hard-face cores, with diameter ranging from 2...20 mm. Then they are grinded. The cores are made of hard alloys with wolfram carbide grain size less than 1 μm , and the 8...25% of cobalt binding content. The cores are produced by the hard-face powder pressing and further sintering in vacuum-compressor furnace. When sintering the cores shrink, followed with the contraction process. The core bending may reach up to 0.35 mm and more. Such curve cores are not used for grinding. Therefore, the problem is to find some optional technologies of treating the hard-face cores for the puncheons.

It is suggested to remove the puncheon's lateral surface with electrical arc at the stage of the hard-face blank treatment. This allows removing large allowances of material along with the shortest treatment time. It is suggested to produce the puncheon lateral surface with roughness of $R_a = 16...30 \mu\text{m}$ following rough machining. Thus, the large allowances of material are removed with the shortest treatment time. Here, the treatment cycle of the hard-face puncheon's lateral surface reduces by 1.4...1.8 times.

The substantiation was made for the process flow diagram covering fabrication of the hard-face puncheon's lateral surface subject to specifics of the physical mechanism of formation and the hydrodynamic phenomena in the inter-electrode gap. The analytical links were determined between the technological specifications of the process featuring BK8 alloy rough machining with electrical arc, the processing modes and geometrical parameters. The resulting models enable managing the capacity, specific capacity, specific consumption of electric power and the treated surface accuracy, along with forecasting and optimizing these parameters. The technical solution is offered enabling to expand the processing capacities of the hard-face puncheon's production.

electric arc, puncheon, hard alloy, tool, technology, equipment

Одержано (Received) 15.10.2018

Прорецензовано (Reviewed) 5.12.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 631.33.02

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.135-142>**М.Л. Заєць**, доц., канд. техн. наук*Житомирський національний агроекологічний університет, м. Житомир, Україна**e-mail: mzaec81@gmail.com*

Визначення швидкості руху насіння по розподільнику сошника для підґрунтового-розкидного способу сівби

Розглядається визначення оптимальної форми розподільника та процес розподілу насіння комбінованим розподільником у виді криволінійної призми. Від форми розподільника залежить якість розподілення насіння по ширині смуги, що засівається. Рівномірність розташування насіння по ширині захвату сошника буде характеризуватися швидкістю надходження насіння на похилу ділянку розподільника.

швидкість, сівба, розподільник, твірна, рівномірність**М.Л. Заєц**, доц., канд. техн. наук*Житомирский национальный агроэкологический университет, Житомир, Украина*

Определение скорости движения семян по распределителю сошника для подпочвенно-разбросного посева

Рассматривается определение оптимальной формы распределителя и процесс распределения семян комбинированным распределителем в виде криволинейной призмы. От формы распределителя зависит качество распределения семян по ширине полосы, которая засеивается. Равномерность расположения семян по ширине захвата сошника будет характеризоваться скоростью поступления семян на наклонную участок распределителя.

скорость, посев, распределитель, образующая, равномерность

Постановка проблеми. Суттєвою різницею між існуючими рядковими сівалками і сівалками для підґрунтового-розкидного способу сівби є конструкція сошників, зокрема їх розподільних пристроїв. Сошники сівалок для підґрунтового-розкидної сівби у більшості випадків виконані у вигляді культиваторної лапи з різною шириною захвату [5].

Розподільник насіння є одним з основних елементів сошника, який безпосередньо впливає на рівномірність розподілу технологічного матеріалу по площі поля та збільшення засіваємої ширини смуги. Різні форми відбивачів та конструкції розподільних пристроїв у сошниках для підґрунтового-розкидного способу сівби зумовлені підвищенням рівномірності розподілу насіння по площі поля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідниками [1,2,3,4] доведена перевага розподільників із криволінійними твірними, на робочій поверхні яких насіння плавно змінюють напрямок свого руху з мінімальними втратами кінетичної енергії надходять у підсошниковий простір і висівається на дно борозни.

Для того щоб швидкість руху насіння досягла максимальних значень у точці сходу з кривої, крива повинна задовольняти умовам найшвидшого переміщення часток за деякий проміжок часу. Такою кривою по визначенню є брахистохрона.

Теоретичним і експериментальним дослідженням руху насіння по криволінійній твірній присвячена робота Кірова А.А. [3]. Він розглядає брахистохрону як сукупність прямолінійної ділянки й кола постійного радіуса r , а рух насіння по криволінійній твірній розглядає як рух насіння по такому колу.

Постановка завдання. Враховуючи те, що процес розподілу насіння при підгрунтового-розкидного способі сівби носить випадковий характер, тому що визначається великою кількістю факторів, які неможливо повністю врахувати, то його можна розглядати у відповідності із законами теорії ймовірностей [2]. У зв'язку з цим пропонуються різні типи технологічних схем розподільних пристроїв сошників з метою проектування та виготовлення їх для подальшого дослідження.

Виклад основного матеріалу. Отримана формула швидкості сходу (1) із криволінійної ділянки утворюючої V із припустимою точністю може бути прийнята для розрахунку траєкторії і швидкості руху насіння після сходу з криволінійної ділянки розподільника:

$$V = \sqrt{e^{-\pi f} \left(V_0 \cdot \cos^2 \gamma_0 - \frac{6 \cdot g \cdot r \cdot f}{1 + 4 \cdot f} \right) + 2 \cdot g \cdot r \cdot \frac{1 - 2 \cdot f^2}{1 + 4 \cdot f^2}}, \quad (1)$$

де f – коефіцієнт тертя зерна по сталі;

V_0 – швидкість надходження насіння на криволінійну ділянку твірної, м/с;

γ_0 – кут між вертикальною віссю в і початковим напрямком швидкості V_0 ;

g прискорення вільного падіння, м/с²;

Однак, у дійсності радіус кривизни брахистохрони змінюється по визначеному закону. Відмінність дійсного радіуса брахистохрони від радіуса кола призводить до того, що і дійсна швидкість руху з криволінійної твірної буде відрізнятися від розрахункової. А тому що від швидкості руху насіння після сходу з криволінійної ділянки розподільника буде залежати запас кінетичної енергії, що обумовлює дальність розподілу насіння у підсошниковому просторі, то розгляд даного питання є важливим і необхідним етапом теоретичного дослідження.

Розглянемо рух одиничного насіння по брахистохроні, що є твірною розподільника (рис. 1).

Частка насінного матеріалу надходить на криволінійну поверхню з початковою швидкістю V_0 . При русі по криволінійній поверхні на насіння діють: вага, сила тертя, відцентрова сила і сила нормального тиску.

Проектуючи сили на нормаль і дотичну, запишемо систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} m \cdot \frac{dV}{dt} &= m \cdot g \cdot \sin \gamma - f \cdot N \\ N &= m \cdot \frac{V^2}{\rho(\varphi)} + m \cdot g \cdot \cos \gamma \end{aligned} \quad ; \quad (2)$$

де m – маса насіння, кг;

V – швидкість насіння, м/с;

N – сила нормального тиску, Н;

γ – кут нахилу дотичної до обрію, радіан;

t – час руху, с;

$\rho(\varphi)$ – радіус кривизни брахистохрони, у залежності від кута повороту твірної кола (φ),

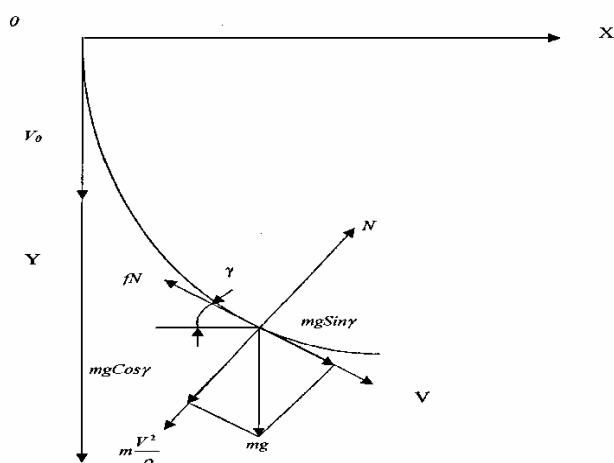


Рисунок 1 – Схема сил, що діють на матеріальну точку при русі по брахістохроні
Джерело: розроблено автором

Відомо, що брахістохрона утворена колом, що котиться по прямій без ковзання. Отже, для будь-якої точки, радіус кривизни брахістохрони буде дорівнює хорді кола АС (рис. 2.). Причому один кінець хорди буде належати прямій, по якій котиться коло.

З'єднаємо точки А і С з центром кола О. Розглянемо отриманий рівнобедрений трикутник АОС. З трикутника одержимо:

$$\sphericalangle OCA = \frac{\varphi}{2}, \quad (3)$$

де φ – кут, на який повернеться коло при перекочуванні за час t .
З прямокутного трикутника ОВС визначимо:

$$BC = OC \cdot \cos \frac{\varphi}{2} = \frac{d}{2} \cdot \cos \frac{\varphi}{2}; \quad (4)$$

де d – діаметр твірної кола, м.

Отже, шуканий радіус кривизни брахістохрони АС:

$$\rho(\varphi) = d \cdot \cos \frac{\varphi}{2}; \quad (5)$$

Перенесемо АС паралельно самій собі до перетину з брахістохроною (А'С) і через точку перетину А проведемо лінію горизонту А'С і дотичну І, тоді:

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \frac{\varphi}{2} \quad (6)$$

Врахуємо, що за час t коло повернеться на кут φ , тобто :

$$dt = \frac{d\varphi}{V} \rho(\varphi) = \frac{d\varphi}{V} \cdot d \cdot \cos \frac{\varphi}{2}.$$

Підставимо значення (4), (5) і (6) у систему рівнянь (2), і після перетворень одержимо:

$$V \cdot \frac{dV}{d\varphi} + f \cdot V^2 = g \cdot d \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2} - g \cdot d \cdot \frac{\sin \varphi}{2}. \quad (7)$$

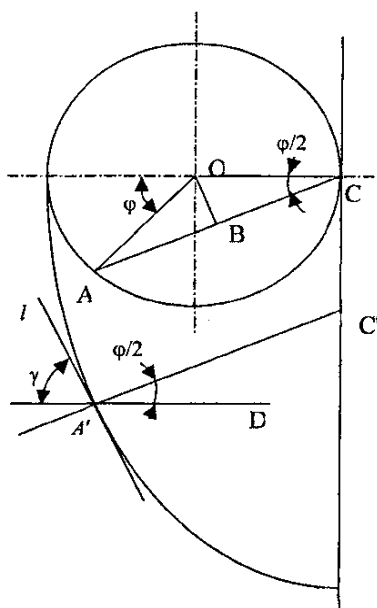


Рисунок 2 - Схема для визначення радіуса кривизни брахистохрони
Джерело: розроблено автором

Отримане диференціальне рівняння є рівнянням Бернуллі.
Загальне рішення рівняння:

$$V^2 = g \cdot d \cdot \left[\frac{\cos^2 \frac{\varphi}{2}}{f} + \frac{2 \cdot f \cdot \sin \varphi - \cos \varphi}{2 \cdot f \cdot (4 \cdot f^2 + 1)} - \frac{2 \cdot f \cdot \sin \varphi - \cos \varphi}{4 \cdot f^2 + 1} \right] + e^{-2 \cdot f \varphi} \cdot C; \quad (8)$$

де C – постійна інтегрування

Постійну інтегрування визначимо з початкових умов: при куті повороту твірного кола брахистохрони, що відповідає точці потрапляння насіння на криволінійну твірну розподільника;

$$\varphi = \varphi_0 - \varphi_1, \quad V = V_0.$$

$$C = e^{2 \cdot f \cdot \varphi_1} \cdot \left(V_0^2 - g \cdot d \cdot \left[\frac{\cos^2 \frac{\varphi_1}{2}}{f} + \frac{2 \cdot f \cdot \sin \varphi_1 - \cos \varphi_1}{2 \cdot f \cdot (4 \cdot f^2 + 1)} - \frac{2 \cdot f \cdot \sin \varphi_1 - \cos \varphi_1}{4 \cdot f^2 + 1} \right] \right). \quad (9)$$

З урахуванням того, що $\varphi_0 = \pi$, можна записати:

$$\varphi = \pi - \varphi_1. \quad (10)$$

Підставивши значення постійної інтегрування C (вираз 9) і значення кута φ (вираз 10) у рівняння (8), провівши відповідні перетворення, одержимо формулу для визначення швидкості сходу насіння з криволінійної твірної розподільника:

$$V_{cx} = \sqrt{g \cdot d \cdot \left[\frac{\cos^2 \frac{\pi - \varphi_1}{2}}{f} + \frac{2 \cdot f \cdot \sin \varphi_1 + \cos \varphi_1}{2 \cdot f \cdot (4 \cdot f^2 + 1)} - \frac{2 \cdot f \cdot \sin \varphi_1 + \cos \varphi_1}{4 \cdot f^2 + 1} \right] + e^{2 \cdot f \cdot (2 \cdot \varphi_1 - \pi)} \left(V_0^2 - g \cdot d \cdot \left[\frac{\cos^2 \frac{\pi - \varphi_1}{2}}{f} + \frac{2 \cdot f \cdot \sin \varphi_1 - \cos \varphi_1}{2 \cdot f \cdot (4 \cdot f^2 + 1)} - \frac{2 \cdot f \cdot \sin \varphi_1 - \cos \varphi_1}{4 \cdot f^2 + 1} \right] \right)}. \quad (11)$$

При установці дільника під кутом до горизонту, вираз (11) запишеться в такому вигляді:

$$V_{cx} = \sqrt{g \cdot \cos \alpha \cdot d \cdot \left[\frac{\cos^2 \frac{\pi - \varphi_1}{2}}{f} + \frac{2 \cdot f \cdot \sin \varphi_1 + \cos \varphi_1}{2 \cdot f \cdot (4 \cdot f^2 + 1)} - \frac{2 \cdot f \cdot \sin \varphi_1 + \cos \varphi_1}{4 \cdot f^2 + 1} \right] + e^{2 \cdot f \cdot (2 \cdot \varphi_1 - \pi)} \left(V_0^2 - g \cdot \cos \alpha \cdot d \cdot \left[\frac{\cos^2 \frac{\pi - \varphi_1}{2}}{f} + \frac{2 \cdot f \cdot \sin \varphi_1 - \cos \varphi_1}{2 \cdot f \cdot (4 \cdot f^2 + 1)} - \frac{2 \cdot f \cdot \sin \varphi_1 - \cos \varphi_1}{4 \cdot f^2 + 1} \right] \right)}. \quad (12)$$

Кут φ_1 визначиться по наступній формулі:

$$\varphi_1 = \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot a}{d} \right), \quad (13)$$

де a – відстань від осі розподільника до точки потрапляння насіння, м (рис.3).

Для аналізу залежності швидкості сходу від коефіцієнта тертя підставимо в залежність (12) значення $f=0,2 \dots 0,5$, при постійному значенні a і проведемо розрахунки. З отриманої залежності $V(f)$ (рис.4) видно, що коефіцієнт тертя в незначному мірі (у межах зміни f зміна швидкості складає 5,5...5,9%) впливає на швидкість сходу.

Основним фактором, що впливає на швидкість сходу, є діаметр твірної кола брахистохрони. Оптимальний діаметр кола і, відповідно, геометричний розмір самого розподільника визначиться з погляду достатності швидкості сходу з криволінійної ділянки твірної розподільника.

Для аналізу залежності швидкості руху від координати влучення насіння на криволінійну поверхню підставимо в залежність (13) значення $a = 0 \dots 0,02$ і проведемо розрахунки по залежності (12).

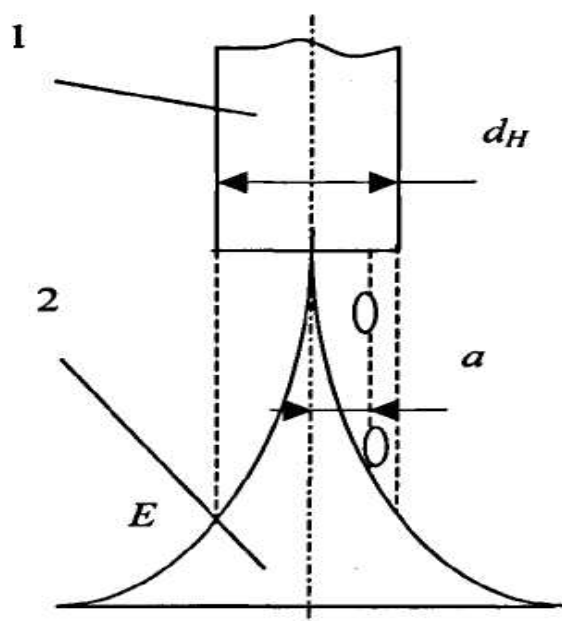
За результатами розрахунків побудуємо графічну залежність швидкості руху від координати потрапляння насіння на криволінійну поверхню розподільника $V(a)$ (рис. 5).

Найбільша швидкість сходу буде в тих насінин, що потрапляють на розподільник у крайній точці (E) проекції направляча насіння (рис. 3.), через те, що ці насінини будуть проходити меншу відстань по криволінійній поверхні і відповідно втрати кінетичної енергії на роботу сил тертя будуть менші. У цьому випадку кут φ_1 визначитися по наступній залежності:

$$\varphi_1 = \arccos\left(1 - \frac{d_n}{d}\right), \quad (14)$$

де d_n – внутрішній діаметр направляча, м.;

Таким чином, використовуючи отримані залежності (12, 13, 14.) можна визначити швидкість руху насіння із криволінійної твірної в залежності від конструктивних параметрів (діаметра твірного кола, діаметра перетину вихідного направляча або насіннепроводу) розподільника і координати потрапляння насіння на криволінійну поверхню розподільника. Для підвищення дальності розподілу насіння по ширині смуги, яка засівається сошником, розподільник повинний використовуватися з похилою площиною, що є його основою.



1 – направляч, 2 – розподільник

Рисунок3 – Схема надходження насіння на розподільник

Джерело: розроблено автором

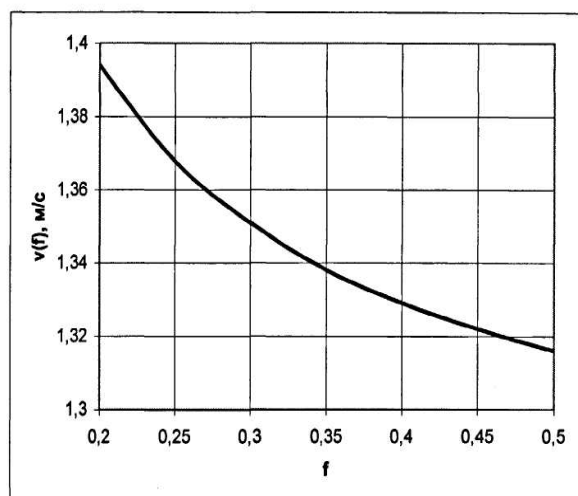


Рисунок4 - Теоретична залежність швидкості сходу насіння від коефіцієнта тертя

Джерело: розроблено автором

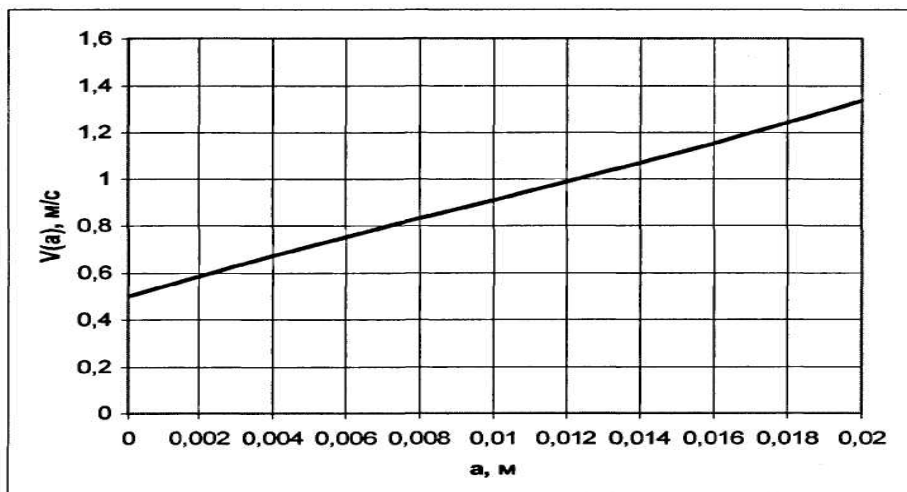


Рисунок 5 – Теоретична залежність швидкості руху насіння від координати потрапляння насіння на криволінійну поверхню розподільника

Джерело: розроблено автором

Висновки. Проведені теоретичні дослідження процесу розподілу насіння комбінованим розподільником дозволяють зробити наступні висновки:

1. Одним зі шляхів збільшення дальності розподілу насіння по ширині розсіву сошником є застосування розподільника, що представляє собою комбінацію дільника з криволінійної твірною у виді брахістохрони, і похилої поверхню, що розподіляє, і є основою розподільника.

2. Отримано теоретичні залежності для визначення конструктивних параметрів комбінованого розподільника: швидкості сходу з криволінійної твірної від діаметра твірної кола брахістохрони; дальності розподілу насіння (у параметричному виді) від конструктивних параметрів похилої ділянки (довжини похилої ділянки і кута його встановлення до горизонту), використання яких дозволяє визначити оптимальні параметри розподільника і похилої ділянки для забезпечення розсіву насіння по ширині захвату сошника з необхідними дальністю і рівномірністю.

3. Швидкість руху насіння із криволінійної твірної розподільника залежить від діаметра твірної кола брахістохрони і координати потрапляння насіння на криволінійну поверхню.

Список літератури

1. Герук С.М., Заєць М.Л. Не ігноруймо експериментальні сошники з комбінованим розподільником посівного матеріалу. *Журнал «Зерно і хліб»*. 2013. Вип. 2 (70). С. 36–39.
2. Заєць М. Л. Обґрунтування оптимальної величини ексцентриситету установки розподільника сошника для розкидного способу сівби сільськогосподарських культур. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.*, 2008. Вип. 38. С. 87–91.
3. Павельчук Ю.Ф. Обґрунтування параметрів сошників для сівби зернових культур підґрунтового розкидного способом: дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 / Подільський держ. аграрно-техн. ун-т, Кам'янець-Подільський, 2009. с.
4. Заєць М. Л. Результати експериментальних досліджень сошника для розкидного способу сівби. *Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь* : зб. тез. II Всеукр. наук.-практ. конф., 7-8 квітня 2016 р. Житомир : ЖАТК, 2016. С. 195–197.
5. Ковріков І.Т. Основні принципи розробки розподільючих пристроїв підґрунтового-розкидного сошників зернових сівалок. *Трактори і сільськогосподарські машини*, 1983. №5. С. 13-14

6. Заєць М. Л. Удосконалення способу сівби зернових колосових культур. *Наукові читання – 2013 : наук.-теорет. зб.* Житомир : ЖНАЕУ, 2013. Т. 1. С. 312–319.

References

1. Heruk, S.M., Zaiets', M.L. (2013). Ne ihnorujmo eksperymental'ni soshnyky z kombinovanyim rozpodiliuvachem posivnoho materialu [Do not ignore experimental coulter with a combined seed distributor]. *Zhurnal «Zerno i khlib»*, Vol. 2 (70), 36–39 [in Ukrainian].
2. Zaiets', M. L. (2008). Obgruntuvannia optimal'noi velychyny ekstsentsyrytetu ustanovky rozpodil'nyka soshnyka dlia rozkydnoho sposobu sivby sil'skohospodars'kykh kul'tur [Justification of the optimum eccentricity of the setter distributor for a spreading method of crop sowing] *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil'skohospodars'kykh mashyn. Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Vol. 38, 87–91. [in Ukrainian].
3. Pavel'chuk, Yu.F. (2009). Obgruntuvannia parametriv soshnykiv dlia sivby zernovykh kul'tur pidhruntovo-rozkydnym sposobom [The investigation and improving ploughs for grain-crops sowing underground scattered method]. *Candidate's thesis*. Kam'ianets'-Podil's'kyj [in Ukrainian].
4. Zaiets', M. L. (2016). Rezul'taty eksperymental'nykh doslidzhen' soshnyka dlia rozkydnoho sposobu sivby [Results of experimental researches of a coil for a spreading method of sowing]. *Perspektyvy i tendentsii rozvytku konstruktiv ta tekhnichnoho servisu sil'skohospodars'kykh mashyn i znariad' : II Vseukr. nauk.-prakt. konf. (7-8 kvitnia 2016 r.) – 2nd Scientific and Practical Conference.* (pp. 195–197). Zhytomyr : ZhATK, 2016. S. 195–197.[in Ukrainian].
5. Kovrikov, I.T. (1983). Osnovni pryntsyipy rozrobky rozpodiliuichykh prystroiv pidhruntovo-rozkydnykh soshnykiv zernovykh sivalok [Basic principles of development of distribution devices for subsoil and spreading blades of grain seeders]. *Traktory i sil's'kohospodars'ki mashyny*, 5, 13–14 [in Ukrainian].
6. Zaiets', M. L. (2013). Udoshkonalennia sposobu sivby zernovykh kolosovykh kul'tur [Improvement of the method of sowing grain cereal crops]. *Naukovi chytannia – 2013 : nauk.-teoret. zb. Zhytomyr*, Vol. 1, 312–319 [in Ukrainian].

Maxim Zaets, Assoc. Prof., Phd tech. sci.

Zhytomyr National Agroecological University, Zhytomyr, Ukraine

Parameters Optimization of Combined Valve for Seeds Coulter Sowing Subsoil, Variation Grain Crops

Receiving high and stable yields remains an urgent task of agricultural production. When cultivating crops, in particular grains, special attention should be paid to sowing, because the flaws allowed in its implementation can not be corrected, and one of the main characteristics of the sowing is the uniform distribution of plants in terms of feeding area.

We consider the determination of optimal shape of the distributor and the process of distribution of seeds combined distributor in the form of curved prisms. From the distributor form depends on the quality of seed distribution across the width of the strip that sown. The uniformity of seeds on the location Shovel width will be characterized by the speed of flow of seeds on a sloping plot distributor.

The value of the length of the slope is selected based on the range and uniformity of the distribution of the seed and is 60 mm. The combined distributor can distribute seeds of grain crops at a width of 95–100 mm. When conducting two-factor experiments, it was established that the best distribution index of seeds has a combined distributor made in the form of a two-way curvilinear prism. The design of the coulter for subsoil and spreading of seed of grain crops with a combined seed distributor is developed. During the previous experiments and the search multivariate experiment, the linear regression equations were specified and the most significant factors influencing the optimization parameter were determined.

speed, sowing, distributor, generators uniformity

Одержано (Received) 15.11.2018

Прорецензовано (Reviewed) 23.11.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 631.362.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.143-153>

І.О. Скринник, доц., канд. техн. наук, **І.О. Пісарькова**, інженер-конструктор,
М.М. Петренко, проф., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,
Україна*

e-mail: petrenkonn@i.ua

Механічне травмування насіння

Отримані залежності відношення нормальної до поверхні складової швидкості зернівки пшениці після удару по поверхні до швидкості удару (аналог коефіцієнта миттєвого тертя, від якого залежить травмування зерна) і коефіцієнта травмування насіння від швидкості удару по поверхні, кута її нахилу, матеріалу, геометрії, вологості зерна. Ці дані служать для вибору режимів роботи машин для післязбиральної обробки зерна і геометрії поверхонь їх робочих органів.

пошкодження, зернівка, удар, вологість, поверхня, матеріал, швидкість

И.А. Скринник, доц., канд. техн. наук, **И.А. Писарькова**, инженер-конструктор, **Н.Н. Петренко**, проф., канд. техн. наук

Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Механическое травмирование семян

Получены зависимости отношения нормальной к поверхности составляющей скорости зерновки пшеницы после удара по поверхности к скорости удара (аналог коэффициента мгновенного трения, от которого зависит травмирование зерна) и коэффициента травмирования семян от скорости удара по поверхности, угла ее наклона, материала, геометрии, влажности зерна. Эти данные служат для выбора режимов работы машин для послеуборочной обработки зерна и геометрии поверхностей их рабочих органов.

повреждение, зерно, удар, влажность, поверхность, материал, скорость

Постановка проблеми. Сучасні технології виробництва зернових культур не дозволяють отримати якісне зерно через наявність макро- і мікропошкоджень зернівок, що утворюються при збиранні і післязбиральній обробці врожаю. Механічні пошкодження зерна машинами мають негативний вплив як на насіннєвий матеріал, так і на продовольче зерно. Зернова маса, що має в своєму складі ту чи іншу кількість механічно пошкоджених зерен, менш стійка до зберігання, так як у пошкодженого зерна більш інтенсивне дихання, воно більше виділяє тепла і вологи. Все це призводить до виникнення вогнищ самозігрівання, і, якщо вчасно не вжити відповідних заходів, вся партія зерна може повністю стати непридатною до посіву. До того ж пошкоджене зерно в більшій мірі піддається впливу хвороб (мікроорганізмів) і шкідників [1-8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах Пугачова О.М. [8], Тарасенка О.П. [6,7], Бедыч Т.В. [1,2], Гамадиева А.М. [3], Кирпи М.Я. [5], Кузнецова В.В. [6] і інших вивчені механізми механічних пошкоджень зерна колосових культур, запропонована класифікація видів травмування зернівок, заснована на зміні їх фізико-механічних властивостей. Встановлено, що 30-40% насіння зернових культур не дають сходів через мікропошкодження. При посіві травмованим насінням врожайність зернових знижується. Вивчення травмування зерна в період післязбиральної обробки частіше обмежувалося дослідженнями механічного впливу окремими машинами і механізмами на пошкодження насіння. Не встановлені механізми залежності травмування насіння від комплексної дії швидкості удару зернівки по поверхні, її кута

нахилу, матеріалу, вологості зерна. Ці дані необхідні для вибору режимів роботи машин для післязбиральної обробки зерна і поверхонь їх робочих органів.

Постановка завдання. Встановити вплив різних чинників на відношення нормальної до поверхні складової швидкості зернівки пшениці після удару до швидкості удару (аналог коефіцієнта миттєвого тертя, від якого залежить травмування зерна). Вивчити залежність травмування в процесі його взаємодії з поверхнями робочих органів машин від швидкості удару по поверхні, її кута нахилу, матеріалу, геометрії, вологості зерна.

Виклад основного матеріалу. Пошкодження зернівок визначали прямим або органолептичним (візуальним) методом з використанням цифрового USB мікроскопа Magnifier Ultra Zoom 1000x (MG576) без фарбування і з застосуванням фарбування зерна у 0,5% розчині йоду в йодистому калії.

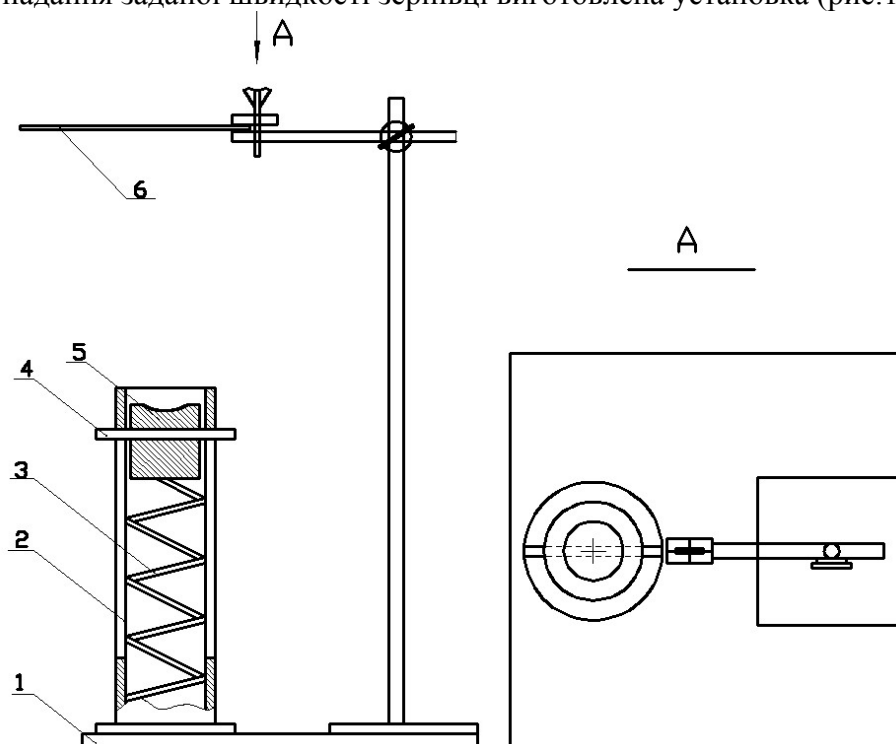
Після просихання зернівки розбирали по шести видам травм:

- зерно з вибитим зародком;
- зерно з пошкодженим зародком;
- зерно з пошкодженою оболонкою зародка;
- зерно з пошкодженою оболонкою зародка і ендосперма;
- зерно з пошкодженою оболонкою ендосперма;
- зерно з пошкодженим ендоспермом.

При проведенні експериментальних досліджень використовували пшеницю «Харківська-39» (тверда). Маса 1000 зерен – 41 г.

При формуванні таблиць і побудові графіків використано показник сумарного травмування зерна.

Для надання заданої швидкості зернівці виготовлена установка (рис.1).



1 - корпус; 2 - труба; 3 - пружина; 4 - фіксатор; 5 - лоток для зерна; 6 – змінна пластина

Рисунок 1 – Установа для визначення травмування насіння при різних швидкостях удару по поверхні

Джерело: розроблено авторами

Зерно до початку роботи кладуть в лоток 5 (рис. 1). Під час переміщення фіксатора 4 в задане по висоті положення стискається пружина 3. Після відпуску фіксатора він разом з лотком для зерна, під дією пружини, переміщується по пазам труби 2 уверх, де миттєво гальмується після зіткнення з верхньою стінкою пазу. Після цього, завдяки дії сили інерції, зернівка вилітає з лотка і вдаряється по поверхні пластини 6.

Кількість повторностей кожного дослідів – 50.

Для проведення досліджень були вибрані поверхні:

- плоска, розташована під різними кутами до вектора швидкості насінини (0, 20, 40, 60, 80 градусів);
- циліндрична різних діаметрів (100, 150, 200, 250 мм).

Матеріали поверхонь: сталь, пластик (HDPV), гума.

Результати експериментальних досліджень.

Таблиця 1 – Коефіцієнт відновлення швидкості зернівки пшениці при ударі по пластині з різними кутами нахилу (K_v , %).

Швидкість V , м/с	Матеріал														
	Сталь					Пластик					Гума				
	Кут нахилу пластини, град.					Кут нахилу пластини, град.					Кут нахилу пластини, град.				
	0	20	40	60	80	0	20	40	60	80	0	20	40	60	80
1	0,57	0,54	0,42	0,28	0,11	0,52	0,48	0,36	0,25	0,08	0,257	0,228	0,160	0,110	0,040
3	0,56	0,53	0,41	0,26	0,11	0,51	0,47	0,35	0,23	0,07	0,245	0,222	0,160	0,110	0,040
5	0,55	0,51	0,39	0,25	0,09	0,50	0,45	0,34	0,21	0,06	0,231	0,218	0,155	0,106	0,037
7	0,53	0,50	0,38	0,24	0,08	0,48	0,43	0,32	0,20	0,05	0,221	0,210	0,150	0,100	0,034
9	0,52	0,48	0,37	0,23	0,07	0,46	0,41	0,31	0,19	0,04	0,201	0,181	0,140	0,100	0,030
11	0,49	0,46	0,36	0,22	0,06	0,42	0,40	0,30	0,18	0,03	0,191	0,168	0,120	0,080	0,028

Джерело: розроблено авторами.

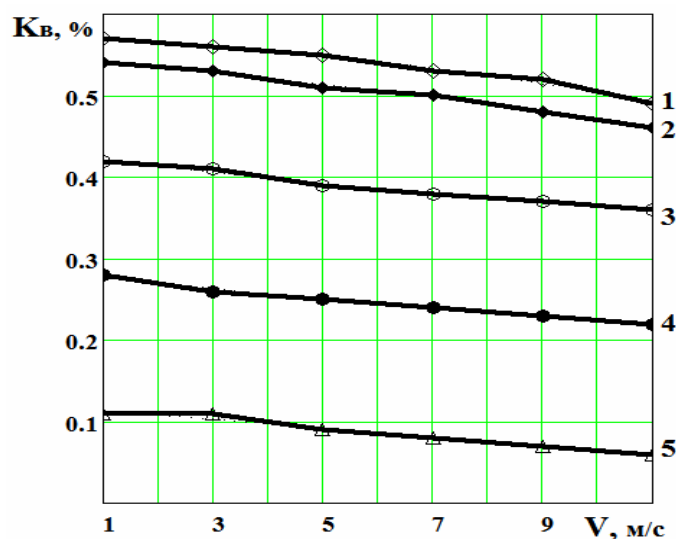


Рисунок 2 – Залежність відношення нормальної до поверхні пластини складової швидкості зернівки пшениці після удару по поверхні до швидкості удару (K_v , %). Матеріал поверхні: **сталь**.

Кути нахилу поверхні: 1-0 град.; 2-20 град.; 3-40 град.; 4-60 град.; 5-80 град.

Джерело: розроблено авторами.

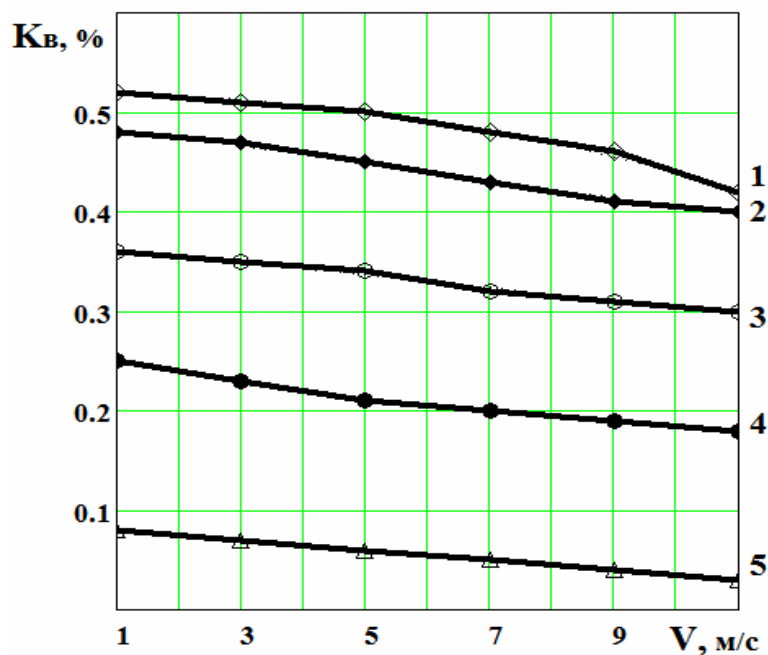


Рисунок 3 – Залежність відношення нормальній до поверхні пластини складової швидкості зернівки пшениці після удару по поверхні до швидкості удару ($K_v, \%$). Матеріал поверхні: **пластик**.

Кути нахилу поверхні: 1-0 град.; 2-20 град.; 3-40 град.; 4-60 град.; 5-80 град.

Джерело: розроблено авторами.

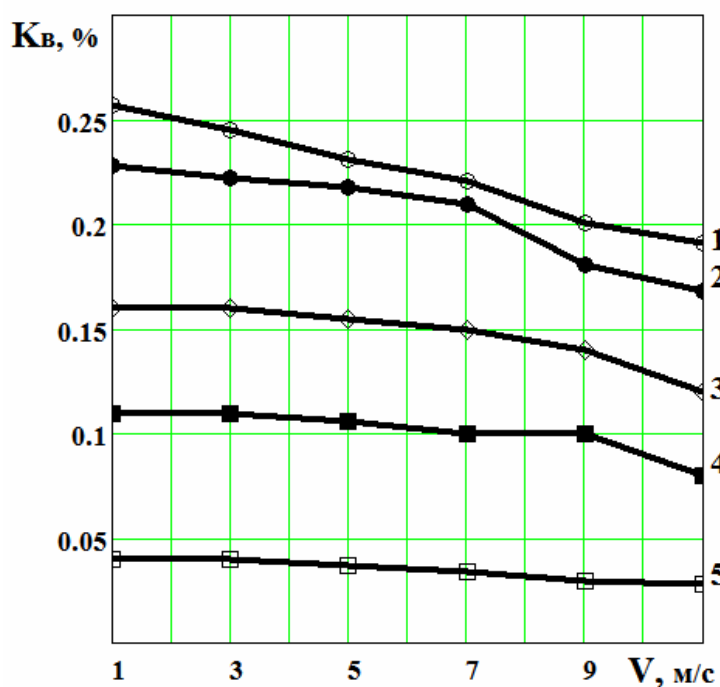


Рисунок 4 – Залежність відношення нормальній до поверхні пластини складової швидкості зернівки пшениці після удару по поверхні до швидкості удару ($K_v, \%$). Матеріал поверхні: **гума**.

Кути нахилу поверхні: 1-0 град.; 2-20 град.; 3-40 град.; 4-60 град.; 5-80 град.

Джерело: розроблено авторами.

З табл. 1 і графіків (рис. 2, 3, 4) слідує, що при збільшенні кута удару по пластині зменшується нормальна складова швидкості після удару, яка визначає величину динамічного навантаження на зернину. Тому, при зростанні кута удару доля пошкодженого насіння зменшується (рис. 5, 6, 7).

Таблиця 2 – Коефіцієнт пошкодження зернівок пшениці при ударі по пластині з різними кутами нахилу ($K_p, \%$).

Швидкість $V, \text{ м/с}$	Матеріал														
	Сталь					Пластик					Гума				
	Кут нахилу пластини, град.					Кут нахилу пластини, град.					Кут нахилу пластини, град.				
	0	20	40	60	80	0	20	40	60	80	0	20	40	60	80
1	0,23	0,18	0,15	0,11	0,05	0,08	0,07	0,05	0	0	0	0	0	0	0
3	2,49	2,20	1,81	1,31	0,39	0,92	0,81	0,59	0,46	0	0	0	0	0	0
5	7,72	6,30	5,01	3,42	1,18	2,91	2,52	1,80	1,32	0,41	0	0	0	0	0
7	14,83	12,31	9,68	6,52	2,34	5,83	5,12	3,62	2,81	0,91	0,60	0,48	0,31	0,23	0
9	24,18	20,81	18,82	12,91	4,31	12,61	11,21	7,91	6,22	1,94	1,31	1,12	0,94	0,61	0
11	34,12	31,61	26,32	17,61	5,92	17,11	15,32	12,12	8,11	2,73	1,42	1,31	1,12	0,64	0

Джерело: Розроблено авторами.

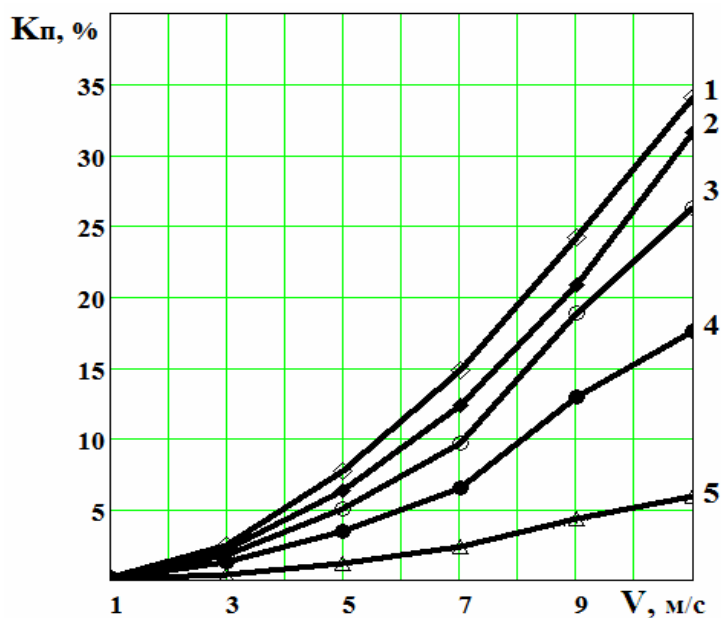


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта пошкодження зернівок пшениці ($K_p, \%$) від швидкості удару по пластині ($V, \text{ м/с}$). Матеріал поверхні: **сталь**.

Кути нахилу поверхні: 1-0 град.; 2-20 град.; 3-40 град.; 4-60 град.; 5-80 град.

Джерело: розроблено авторами.

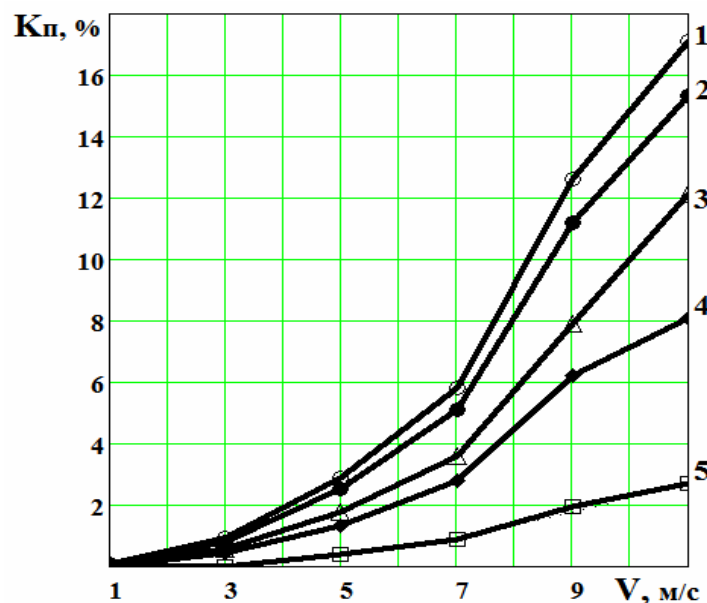


Рисунок 6 – Залежність коефіцієнта пошкодження зернівки пшениці ($K_p, \%$) від швидкості удару по пластині ($V, \text{м/с}$). Матеріал поверхні: **пластик**.
Кути нахилу поверхні: 1-0 град.; 2-20 град.; 3-40 град.; 4-60 град.; 5-80 град.

Джерело: розроблено авторами.

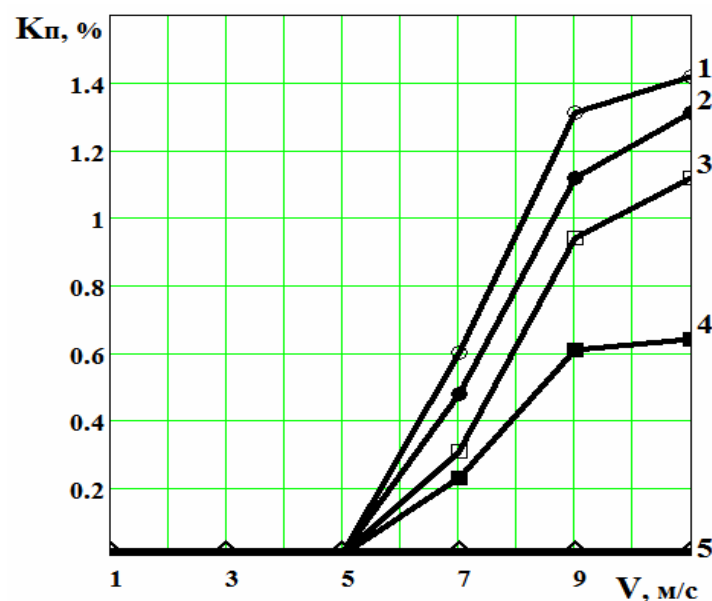


Рисунок 7 – Залежність коефіцієнта пошкодження зернівки пшениці ($K_p, \%$) від швидкості удару по пластині ($V, \text{м/с}$). Матеріал поверхні: **гума**.
Кути нахилу поверхні: 1-0 град.; 2-20 град.; 3-40 град.; 4-60 град.; 5-80 град.

Джерело: розроблено авторами.

При ударних навантаженнях руйнування (пошкодженнях) зернівок відбувається за рахунок напружень, які виникають в місті контакту насінин і поверхні. Напруження прямо пропорційне силі удару і зворотно пропорційне площі контакту. Площа контакту залежить від величини пружної деформації тіл: зерно-поверхня, яка збільшується із зменшенням модуля пружності матеріалів поверхні і зернівки. Таким чином,

травмування насіння при ударі можна зменшити за рахунок вибору раціональної геометрії поверхонь робочих органів зерноочисних машин і їх покриттів.

Збільшення швидкості удару по площині визначає зусилля, що виникає в момент удару, діє на насіння і сприяє пошкодженню зернівок.

При кутах удару 60-80 градусів насіння ушкоджується переважно за рахунок здирання оболонки, оскільки при великих кутах різко збільшується величина швидкості, яка паралельна площині, по якій рухається якийсь час зернівка.

При збільшенні швидкості удару коефіцієнт відновлення зменшується тому, що частина енергії деформації зернівки йде на локальне її руйнування. При цьому значення коефіцієнтів пошкодження зернівок відповідно зростають при збільшенні швидкості (від 1м/с до 11м/с):

- для сталі: 0,23-34,12;
- для пластику: 0,08-17,11;
- для гуми: 0,0-1,42.

Таблиця 3 – Коефіцієнт пошкодження при ударі зернівки пшениці по зовнішній циліндричній поверхні (Кп, %).

Кут удару, град.	Матеріал - сталь			
	Діаметр, мм			
	100	150	200	250
0	27,14	29,17	31,61	33,81
20	18,44	24,12	26,14	29,18
40	12,32	17,56	20,80	24,11
60	6,41	11,18	16,21	18,12
80	0,51	1,03	2,11	4,42

Джерело: розроблено авторами.

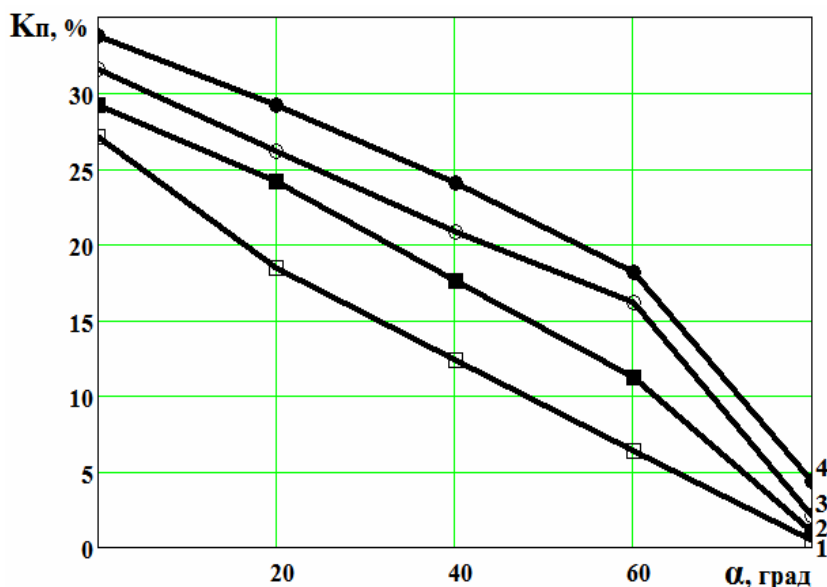


Рисунок 8 - Залежність коефіцієнту пошкодження (Кп,%) зернівки пшениці від кута удару по зовнішній циліндричній поверхні (α,град.).

Матеріал поверхні: сталь. Швидкість удару V=11 м/с.

Діаметри циліндра: 1 – 100мм, 2 – 150мм, 3 – 200мм, 4 – 250мм.

Джерело: розроблено авторами.

При ударі по зовнішній поверхні циліндру коефіцієнт ушкодження зернівки зі збільшенням кута удару і зменшенням діаметра циліндра зменшується в основному за рахунок зменшення ушкодження оболонки, оскільки при цьому знижується час контакту насінини з випуклою криволінійною поверхнею після удару (рис. 8).

Таблиця 4 – Коефіцієнт пошкодження при ударі зернівки по внутрішній циліндричній поверхні (Кп, %).

Кут удару, град	Матеріал - сталь			
	Діаметр, мм			
	100	150	200	250
0	41,08	39,16	38,03	37,42
20	37,95	36,72	34,16	33,94
40	35,12	33,18	31,82	29,48
60	31,18	29,01	26,11	23,17
80	18,94	16,04	14,85	12,04

Джерело: розроблено авторами.

При ударі зернівки по внутрішній циліндричній поверхні степінь пошкодження зернівок збільшується через збільшення тривалості ковзання насінини по поверхні (рис.9).

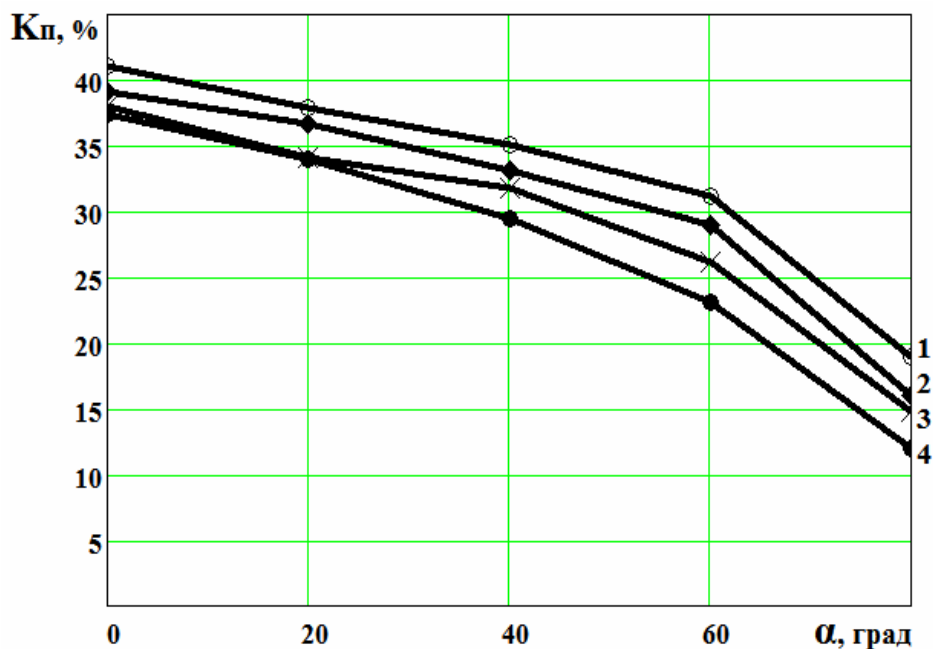


Рисунок 9 – Залежність коефіцієнту пошкодження (Кп, %) зернівки пшениці від кута удару по внутрішній циліндричній поверхні (α, град.).

Матеріал поверхні: сталь. Швидкість удару V=11 м/с.

Діаметри циліндра: 1 – 100 мм, 2 – 150 мм, 3 – 200 мм, 4 – 250 мм

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 5 – Залежність коефіцієнта пошкодження зернівки ($K_p, \%$) від вологості ($W, \%$). Швидкість 11 м/с

Вологість ($W, \%$)	7,6	10,1	12,7	15,3	17,7	20,2	22,8
Коефіцієнт пошкодження зернівки ($K_p, \%$)	23,9	18,7	14,8	16,1	20,5	26,4	30,9

Джерело: розроблено авторами.

Для швидкості удару зерна по сталевій пластині 11 м/с відсоток травмування зернівок найменший при діапазоні вологості насіння $W = 12,7-15,3 \%$. З цього можна зробити висновок, що дана вологість може бути раціональною при очищенні зерна пшениці машинами. Зменшення чи збільшення цього показника приводить до збільшення відсотку травмування зернівок.

Висновки. Встановлено, що при збільшенні кута удару зернівки по поверхні зменшується нормальна складова швидкості після удару, яка визначає величину динамічного навантаження на зернину. Тому при зростанні кута удару доля пошкодженого насіння зменшується. При ударних навантаженнях руйнування (пошкодженнях) зернівок відбувається за рахунок напружень, які виникають в місті контакту насінин і поверхні. Напруження прямо пропорційне силі удару і зворотно пропорційне площі контакту. Площа контакту залежить від величини пружної деформації тіл: зерно-поверхня, яка збільшується із зменшенням модуля пружності матеріалів поверхні і зернівки. Таким чином, травмування насіння при ударі можна зменшити за рахунок вибору раціональної геометрії поверхонь робочих органів зерноочисних машин і їх покрить.

Із збільшенням швидкості удару насінини по поверхні коефіцієнт її відновлення зменшується тому, що частина енергії деформації зернівки йде на локальне її руйнування. При цьому значення коефіцієнтів пошкодження зернівок відповідно зростають при збільшенні швидкості (від 1 м/с до 11 м/с).

У випадку удару насінини по зовнішній поверхні циліндру коефіцієнт ушкодження зернівки зі збільшенням кута удару і зменшенням діаметра циліндра зменшується в основному за рахунок зменшення ушкодження оболонки, оскільки при цьому знижується час контакту насінини з випуклою криволінійною поверхнею після удару.

При ударі насінини по внутрішній циліндричній поверхні степінь пошкодження зернівок збільшується через збільшення тривалості ковзання насінини по поверхні.

Встановлено, що відсоток травмування зернівок найменший при діапазоні вологості насіння $W = 12,7-15,3 \%$, яка може бути раціональною при очищенні зерна пшениці машинами. Зменшення чи збільшення цього показника призводить до збільшення відсотку травмування зернівок.

Ці дані служать для вибору режимів роботи машин для післязбиральної обробки зерна і поверхонь їх робочих органів.

Список літератури

1. Бедыч Т.В. Классификация механических повреждений зерна машинами непрерывного транспорта и меры по их устранению. *Международный сельскохозяйственный журнал*. Москва, 2008. №2. С. 62.
2. Бедыч Т.В. Влияние рабочих органов машин на травмируемость зерна. *Международный сельскохозяйственный журнал*. Москва, 2008. №4. С. 71.
3. Гимадиев А.М. Травмирование семян. URL: <http://www.agroinform.ru/2010/06/travm.htm>
4. Дерев'янюк Д.А., Тарасенко О.П., Оробінський В.І. Вплив травмування на якість насіння зернових культур : монографія. Житомир: Нілан-ЛТД, 2012. 440 с.
5. Кирпа М.Я., Базілева Ю.С. Вплив різних типів травмування на якість насіння гібридів кукурудзи. *Наук. пр. ПФ «КАТУ» НАУ*. Сімферополь, 2008. Вип. 107. С. 68-71.
6. Кузнецов В.В., Манойлина С.З. Совершенствование методики оценки микроповреждения зерновок. *Вестник ВГАУ*, 2007. №14. С. 121-135.
7. Снижены повреждения зерна крупяных культур при уборке и послеуборочной обработке. / М.Э. Мерчалова и др. *Техника в сельском хозяйстве*, 2012. №4. С. 5-6.
8. Мерчалова М.Э., Тарасенко А.П. Изменение уровня травмирования зерна при послеуборочной обработке. *Современные тенденции развития технологий и технических средств для АПК*. Воронеж, 2014. С. 104-106.
9. Пугачев А.Н. Повреждение зерна машинами. Москва: Колос, 1975. 229 с.
10. Рекомендации по прогнозированию и снижению травмирования семян при послеуборочной обработке / Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежский государственный аграрный университет имени К.Д. Глинки» (ФГОУ ВПО ВГАУ им. К.Д. Глинки), 2010. 11 с.
11. Тарасенко А.П., Оробинский В.И., Мерчалова М.Э., Сорокин Н.Н. Совершенствование технологии получения качественных семян и продовольственного зерна. *Лесотехнический журнал*, 2014. Т. 4, №1 (13). С. 36-40.
12. Тарасенко А.П. Совершенствование механизации производства семян зерновых культур / А.П. Тарасенко и др. Москва: Росинформагротех, 2014. 60 с.
13. Травмирование семян. URL: <http://www.agrocounsel.ru/travmirovanie-semyan>
14. Чернышов С.В., Мерчалова М.Э., Тарасенко А.П. Снижение травмирования зерна нориями. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*, 2008. №10. С. 6.

References

1. Bedych, T.V. (2008). Klassifikacija mehanicheskikh povrezhdenij zerna mashinami nepreryvnogo transporta i mery po ih ustraneniu [Classification of Mechanical Damage of Grains by Machines of Continuous Transportation and Measures to Eliminate Them]. *International Agricultural Magazine*, 2, 62 [in Russian].
2. Bedych, T.V. (2008). Vlijanie robochih organov mashin na travmiruemost' zerna [Influence of Machine Working Elements on the Damage of Grain]. *International Agricultural Magazine*, 4, 71. [in Russian].
3. Gimadiev, A.M. (2010). Travmirovanie semjan [Grains Damage]. *agroinform.ru*. Retrieved from <http://www.agroinform.ru/2010/06/travm.htm> [in Russian].
4. Derevyanko, D.A., Tarasenko, O.P., Orobinskiy, V.I. (2012). Vplyv travmuvannia na iakist' nasinnia zernovykh kul'tur [Influence of Damage on the Quality of Seeds of Grain Crops]. Zhytomyr: Nilan LTD [in Ukrainian].
5. Kyrpa, M.Ya., Bazileva, Yu.S. (2008). Vplyv riznykh typiv travmuvannia na iakist' nasinnia hibrydiv kukurudzy [Effect of Different types of Damage on the Quality of Maize Hybrid Seeds]. *Scientific Works of PF "KATU" NAU*, Issue 107, 68-71. [in Ukrainian].
6. Kuznetsov, V.V., Manoylina, S.Z. (2007). Sovrshenstvovanie metodiki ocenki mikropovrezhdenija zernovok [Improvement of Methodology of Grain Micro-Damage Assessment]. *Bulletin of Voronezh State Agrarian University*, 14, 121-135. [in Russian].
7. Merchalova, M.E., Milovanov, V.V., Tarasenko, A.P., Orobinskiy, V.I., Sidorov, S.A. (2012). Snizheni povrezhdenija zerna krupnykh kul'tur pri uborke i posleuborochnoj obrabotke [Reduction of Grain Damage to Cereal Crops During Harvesting and Post-harvest Processing]. *Engineering in agriculture*, 4, 5-6. [in Russian].
8. Merchalova, M.E., Tarasenko, A.P. (2014). Izmenenie urovnja travmirovaniya zerna pri posleuborochnoj obrabotke [Changes in the Level of Grain Damage During Post-harvest Processing]. *Modern trends in the development of technologies and technical means for agro-industrial complexes*, 104-106. [in Russian].

9. Pugachev, A.N. (1975). Povrezhdenie zerna mashinami [Grain Damage by Machines]. Moscow: Kolos [in Russian].
10. *Recommendations on Forecasting and Reduction of Grain Damage in Post-harvest Processing.* (2010). Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Voronezh State Agricultural University named after K.D. Glinka" [in Russian].
11. Tarasenko, A.P., Orobinskiy, V.I., Merchalova, M.E., Sorokin, N.N. (2014). Covershenstvovanie tehnologi poluchenija kachestvennyh semjan i prodovol'stvennogo zerna [Improvement of Technology of Obtaining Quality Seeds and Food Grain]. *Forestry magazine, Vol. 4, 1 (13)*, 36-40. [in Russian].
12. Tarasenko, A.P., Orobinskiy, V.I., Gievskiy, A.M. (2014). Sovershenstvovanie mehanizacii proizvodstva semjan zernovyh kul'tur [Improvement of Mechanization of Grain Crops Production]. Moscow: Rosinformagrotech [in Russian].
13. Travmirovaniye semjan [Grain Damage]. *agroconsult.ru*. Retrieved from <http://www.agroconsult.ru/travmirovaniye-semyan> [in Russian].
14. Chernyshov, S.V., Merchalova, M.E., Tarasenko, A.P. (2008). Reduction of Grain Damage by Grain Elevators [Snizhenie travmirovaniya zerna norijami]. *Mechanization and electrification of agriculture, 10*, 6 [in Russian].

Ivan Skrynnik, Assoc. Prof., Phd tech. sci., **Iryna Pisarkova**, design engineer, **Mykola Petrenko**, Prof., Phd tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Mechanical Grain Damage

The objective of the article is to establish the influence of various factors on the ratio of the normal to the surface of the wheat grain velocity component after impact on the impact velocity (the analogue of the coefficient of instant friction which influences grain damage). Another objective is the study of the dependence of damage in the process of its interaction with the surfaces of working elements of machines on speed impact with the surface, its tilt angle, material, geometry and grain humidity.

It has been established that when the angle of impact of grain with the surface increases, then the normal component of velocity after impact is reduced. It determines the rate of the dynamic load on the grain. Therefore, with the increase of the angle of impact, the proportion of damaged grains decreases. Under impact loads, the destruction (damage) of grains takes place due to stresses (tension) that occur in the place contact of grains and the surface. The tension is directly proportional to the impact force and inversely proportional to the contact area. The contact area depends on the rate of the elastic deformation of the bodies: grain – surface, which increases with the decrease of the elastic modulus of the surface materials and grains. With the increase in the velocity of impact, the restitution factor decreases because part of the energy of grain deformation goes to its local destruction. At the same time, the values of the coefficients of grain damage increase accordingly with increasing velocity (from 1 m/s to 11 m/s). When impacting with the outside surface of the cylinder, the damage coefficient of the grain decreases with the increase in the angle of impact and the decrease in cylinder diameter. It mainly happens due to reducing the damage of the shell, as this reduces the time of contact of the grain with a convex curvilinear surface after impact.

When the grain impacts with the inner cylindrical surface, the degree of grain damage increases due to the increase in the time of the slip of the grain on the surface. It was established that the percentage of grain damage is the smallest in the range of moisture of the grains at $W = 12.7-15.3\%$, which can be rational in the case of clearing wheat grains by machines. Reducing or increasing this rate leads to the increase in the percentage of grain damage.

Therefore, grain damage during the impact can be reduced by choosing rational technological modes of operation, the geometry of surfaces of working elements of grain cleaning machines and their coatings.

damage, grain, impact, humidity, surface, material, velocity

Одержано (Received) 4.12.2018

Прорецензовано (Reviewed) 10.12.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 621.57

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.154-164>

Л.В. Коломієць, доц., канд. с.-г. наук, **С.А. Мартиненко**, доц., канд. техн. наук,
К.А. Левицька

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький,
Україна*

e-mail: lyudkolomiec11@meta.ua

Оцінка шляхів використання відходів рослинницької продукції

Проаналізовано питання утворення та використання відходів рослинництва. Накреслено шляхи оптимізації поводження з відходами в умовах сьогодення. Доведено доцільність використання біопалива. **рослинництво, солома, стебла, побічні продукти, біоконверсія, брикети, гранули, біопаливо, енергія, відновлювані джерела енергії**

Л.В. Коломиец, доц., канд. с.-х. наук, **С.А. Мартыненко**, доц., канд. техн. наук, **К.А. Левицкая**

Центральноукраинский национальный технический университет, г.Кропивницкий, Украина

Оценка возможностей использования отходов растительной продукции

Проанализирован вопрос образования и использования отходов растениеводства. Очерчены пути оптимизации обращения с отходами в нынешних условиях. Доказано целесообразность использования биотоплива.

растениеводство, солома, стебли, вторичные продукты, биоконверсия, брикеты, гранулы, биотопливо, энергия, возобновляемые источники энергии

Постановка проблеми. В агровиробництві на сьогодні накопичується значна кількість відходів біомаси рослинних решток, які практично ніде не застосовуються. Частина з них приорується, ще деяка – використовується на корм та підстилку в малочисленній галузі тваринництва, та в багатьох випадках поширена практика спалювання залишків соломи, стебел на місці їх утворення. Нераціональне поводження з відходами рослинництва в умовах підвищення вартості традиційних джерел енергії є неприпустимим, оскільки вони являють собою цінну енергетичну сировину, значний і дешевий резерв паливних ресурсів.

Щорічно в Україні побутовими та промисловими користувачами споживається близько 200 млн. т умовного палива, але при цьому власний видобуток становить лише 80 млн. т. Важливим потенційним ресурсом за такого балансу власної та імпортованої енергетичної сировини може стати біопаливо, що є відновлюваним джерелом енергії, крім того, не чинить негативних екологічних наслідків при його використанні.

Частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в первинному споживанні енергії в країнах Європи досягла 12,5% в 2010 р. і на сьогодні зберігається тенденція до збільшення. Згідно з Директивою ЄС 2009/28/ЄС частка ВДЕ в 2020 р. повинна досягти 20%. Незважаючи на фінансову та економічну кризу, деяке зростання виробництва ВДЕ все ж відбувається. Але біля 49% ВДЕ виробляється з деревини і вторинних деревних ресурсів. Збільшення попиту на первинну деревину призводить у ряді випадків до нераціонального вирубування полезахисних насаджень, лісових масивів, санітарно-захисних зелених зон.

Тому на сьогодні є актуальним широке впровадження в господарствах, де активно ведеться вирощування груп культурних рослин, технологічних ліній для переробки пожнивних решток і формування пелетів, гранул та ін. видів біопалива, яке може використовуватися в сучасних паливних системах, котлоагрегатах, ТЕЦ, котлах приватних домоволодінь.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сектор сільського господарства України є досить високорозвиненим, тому тут щорічно генерується великий обсяг різноманітних відходів та залишків, зокрема рослинної продукції. Рослинна біомаса вже у найближчому майбутньому може стати одним з найбільш перспективних джерел одержання твердого біопалива, що особливо актуально на фоні постійного зростання цін на природний газ і вичерпання природних ресурсів корисних копалин.

Виробництво зернових і зернобобових культур в Україні становить порядку 40-50 млн.т/рік при врожайності 25-30 ц/га. Крім товарної частини врожаю, приблизно стільки ж утворюється відходів, або побічної продукції рослинництва (ПП).

Науково-практичний досвід показує, що рослинна біомаса є одним з найбільш перспективних джерел одержання твердого біопалива в Україні. Біопаливо вигідне тим, що ціна на нього не залежить від стрибків цін на викопні види палива і на екологічні податки, що збільшуються. Крім цього, при спалюванні твердого біопалива не спричиняється значного негативного впливу на навколишнє середовище, тому що рослинна сировина дає дуже низький вихід забруднюючих речовин. В сучасних умовах господарювання наявні різноманітні джерела біомаси, включаючи сільськогосподарські відходи, цільове вирощування енергетичних культур, деревину та відходи деревини, що потребують біоконверсії [1-3].

В Україні вже існує певний досвід утилізації соломи зернових та технічних культур для виробництва енергії. В населених пунктах введено в дію більш ніж 100 котлів теплогенераторів, вітчизняного та зарубіжного виробництва, що працюють на тюках соломи. З 2012 р. в окремих областях розпочато виробництво брикетів та гранул з соломи.

За характеристиками плавкості золи, зокрема кукурудзяна солома наближається до деревної біомаси (для порівняння: у деревини температура плавлення золи складає близько 1200⁰С), що забезпечує кращі умови для спалювання порівняно із соломою зернових колосових культур. Крім того, солома кукурудзи містить менше хлору (0,2% маси сухої речовини (с.р.) порівняно із свіжою («жовтою») соломою зернових колосових (0,75% маси с.р.). Це є позитивним фактором з точки зору застосування соломи як палива з огляду на те, що сполуки хлору викликають корозію сталевих елементів паливно-енергетичних установок [3-5].

За елементарним складом кукурудзяна солома майже не відрізняється від соломи інших зернових колосових, тому у них майже однакова теплотворна здатність. Властивості соломи залежать від місця вирощування, періоду збирання та погоди, ґрунту й добрив. Найбільше на теплотворну здатність біомаси кукурудзи впливає вологість під час збирання. Таким чином, заготовляти побічні продукти кукурудзи на зерно для енергетичного використання краще у період, коли вологість біомаси зменшиться до 20%, що приблизно настає після 150 дня від дати сівби, внаслідок природних факторів онтогенезу.

Для поліпшення умов використання соломи необхідно запобігати до тюкування її в полі, що полегшує перевезення та зберігання.

На сьогодні однією з основних сільськогосподарських культур, що вирощується на Україні, є соняшник. Збір в окремі роки сягає до 10 млн.т, при урожайності приблизно 25ц/га. Є тенденція до збільшення площ під соняшником. Це культура

вирізняється серед інших за своєю здатністю збіднювати потенціал ґрунту. Вся олійна група характеризується негативним впливом на земельні ресурси. Соняшник є особливо популярним серед аграріїв, оскільки має високу рентабельність вирощування, а стійкі сорти і гібриди сучасної колекції не підводять виробників в будь-яких погодних умовах. Але відходи вирощування – стебла – є певною проблемою, оскільки потребують значних витрат на попереднє подрібнення та приорювання, і навіть загорнуті в ґрунт, мінералізуються не надто швидко, погіршуючи умови догляду та вирощування культури-послідовника. Вирішенням може стати видалення стебел із поля та переробка їх у паливну сировину [4-6].

Постановка завдання. Необхідно визначити напрямки переробки на біопаливо відходів соломи, стебел соняшнику та кукурудзи, що утворюються в господарстві. Для цього потрібно дослідити можливості біоконверсії відходів; з'ясувати екологічні наслідки від різних способів утилізації рослинних відходів та передумови виробництва біопалива.

Виклад основного матеріалу. Утворені в рослинництві первинні відходи, що включають соломі зернових та інших культур, стебла кукурудзи та соняшнику, кошики соняшнику, а також вторинних – лушпиння соняшнику, гречки, рису та ін. , - частково використовуються на внутрішні потреби господарства, інша частина може бути задіяна в інших виробництвах, але найбільш поширеною є практика невдалої утилізації – спалювання в полі (щоб не витратитись на вивезення), або розміщення на звалищі. Це протирічить будь-яким законам природи. По-перше, вирощена біомаса частково має повертатись в ґрунт для позитивної динаміки органічної речовини (іншу частину має складати органічне удобрення відходами тваринництва). Стосовно агроєкосистем, де відбувається внесення поживних речовин з мінеральним удобренням та перегноєм, допускається винос певної частини біомаси з поля. Але витратити її для локального підігрівання атмосфери (спалюючи на місці утворення) є вкрай безглуздом, з огляду на вартість традиційних видів палива та екологічні наслідки від його видобування та спалювання. Крім того, спалювання веде за собою вигорання органіки верхнього шару ґрунту та загибель ґрунтової мікрофлори, - тобто це не лише протизаконно, але й недопустимо з екологічних міркувань.

Під зернові колосові відведено біля 40% загальних посівних площ, зростає площа посівів соняшнику, скорочується площа посівів одно- та багаторічних кормових культур. Основним відходом вирощування є солома та стебла, у приблизному співвідношенні 1:1, для кукурудзи 1:1,3 (зерно до стебел). Частина, що залишається у вигляді стерні, приорується (рис.1).

Для заготівлі соломи зернових колосових застосовують такі технології:

- потокову, коли подрібнена комбайном солома збирається у причеп і доставляється до місця зберігання;

- копицева, коли копнувач у складі технологічної лінії комбайна формує окремі копиці масою до 300 кг, які залишаються за комбайном, а пізніше забираються і транспортуються волокушами або стогами;

- валкова, - коли спеціальний пристрій в агрегаті з комбайном укладає соломі у валки. Валки надалі можуть тюкуватись валкопідбирачами;

- розсівна, - подрібнювач, агрегований з комбайном, розкидає соломі по полю, щоб оптимізувати умови її загортання у ґрунт під час зорювання. Екологічно, звісно, це найдоцільніший спосіб використання соломи, оскільки органіка мінералізується у ґрунті, поліпшуючи його властивості.

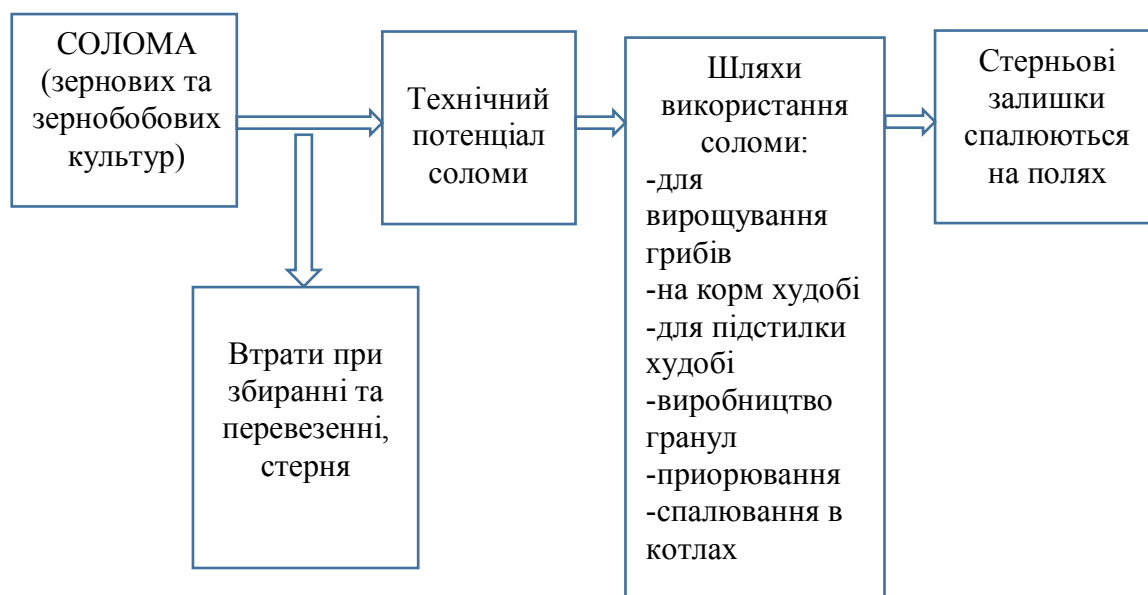


Рисунок 1 – Схема утворення та використання соломи в Україні

Джерело: розроблено на підставі [4]

Кілька десятиліть назад найчастіше застосовувалось валкоутворення, тому що солома використовувалась в тваринництві. Хоча солома і незамінна у використанні як підстилка для худоби, але вона має і ряд недоліків – швидко злежується, вражається грибками, спричиняє запиленість повітря. На сьогодні в умовах недостатнього розвитку галузі тваринництва відкрились можливості використання соломи як енергоносія.

Статистичні дані агрохімічної паспортизації полів, свідчать про негативну динаміку гумусу. Протягом останніх двох десятиліть спостерігається зниження внесення не лише органічних, а й мінеральних добрив, що й призводить до зменшення вмісту гумусу в ґрунтах. На 1 га в середньому зараз вноситься менш ніж 1 тонна гною, а мінімальна потреба становить до 15 т/га. Тому втрати гумусу відбуваються з прискоренням, і становлять за рік біля 0,6-0,7 т/га [7,8].

Солома та стебла є джерелом повернення органіки в ґрунт, але в певних умовах можуть спричиняти небажаний вплив, оскільки збідненість біомаси на азот означає відбирання його з ґрунтових комплексів, тобто коли господарники збираються приорювати солому, то мають потурбуватися про закупівлю та організацію внесення в ґрунт додаткових доз азотних добрив. Негативним впливом на культури є депресивна дія соломи, оскільки під час розпаду вивільняються фенольні сполуки, які токсичні для рослин. Це порушує обмін речовин та викликає хлороз рослин. За умови гарної аерації та високої біологічної активності ґрунтів небажані сполуки розкладаються швидше.

Щорічні відходи сільського господарства в Україні (солома, стебло, качани кукурудзи, стебла та лушпиння соняшнику) становлять приблизно 49 млн. тонн, з яких на власні потреби сільських господарств використовується не більше 34 млн. тонн, решта розподіляється на завжди раціонально, але потенційно може бути використана для виробництва енергії (табл. 1.)

Таблиця 1 - Потенціал біомаси рослинних відходів в Україні

№№ п/п	Тип біомаси	Енергетичний потенціал, млн. т у.п./рік
1	Солома зернових культур	5,6
2	Стебла, качани кукурудзи на зерно	2,4
3	Стебла та лушпиння соняшника	2,3
4	Біогаз з гною	1,6
5	Біогаз з осаду стічних вод	0,2
6	Звалищний газ	0,3
7	Відходи деревини	2,0
8	Паливо з твердих побутових відходів	1,9
9	Рідкі палива з біомаси (біодизель, біоетанол, та ін.)	2,2
10	Енергетичні культури (верба, тополя, та ін.)	5,1
11	Торф	0,6
	Всього	24,2

Джерело: розроблено на підставі [7]

В Україні валовий збір кукурудзи в рік сягає біля 40 млн.т, при урожайності в середньому 48 ц/га зерна.

Рентабельність вирощування кукурудзи традиційно залишається високою, але ціна її закупівель на світових ринках поступово знижується. Тому аграріям необхідно боротися за збільшення доходів з гектару та зменшення собівартості. Зокрема, це може бути заробіток на побічних продуктах кукурудзи. Виділяються наступні складові побічної продукції кукурудзи на зерно: стебло, листя, стрижень та обгортка качана. У кукурудзи співвідношення маси побічних продуктів до зерна залежить від багатьох факторів, у першу чергу від гібриду.

У сучасних технологіях збирання кукурудзи на зерно побічна продукція переважно подрібнюється та розкидається по полю. Якщо комбайни не обладнані подрібнювачами, виникає необхідність у застосуванні мульчувачів, агрегованих з тракторами, які дозволяють якісно подрібнити і рівномірно розподілити рослинні рештки по поверхні поля.

Потенціал побічної продукції (ПП) кукурудзи на зерно в Україні загалом становить біля 35 млн. (рис.2).

Кукурудза – цінна сировина не тільки для АПК, але і для інших галузей економіки, оскільки при повній і комплексній її переробці отримують більше 500 видів різних продуктів. У США та деяких країнах ЄС значні обсяги ПП заготовлюються і використовуються у промислових масштабах для виробництва широкого асортименту продукції. В Україні ПП кукурудзи на зерно переважно використовують як добриво, а також традиційно застосовують у тваринництві як корм і підстилку та у деяких регіонах — як тверде біопаливо [9,10].

Як тверде біопаливо може використовуватись практично вся непродуктивна частина кукурудзи: стебла, стрижні, листя та обгортки.

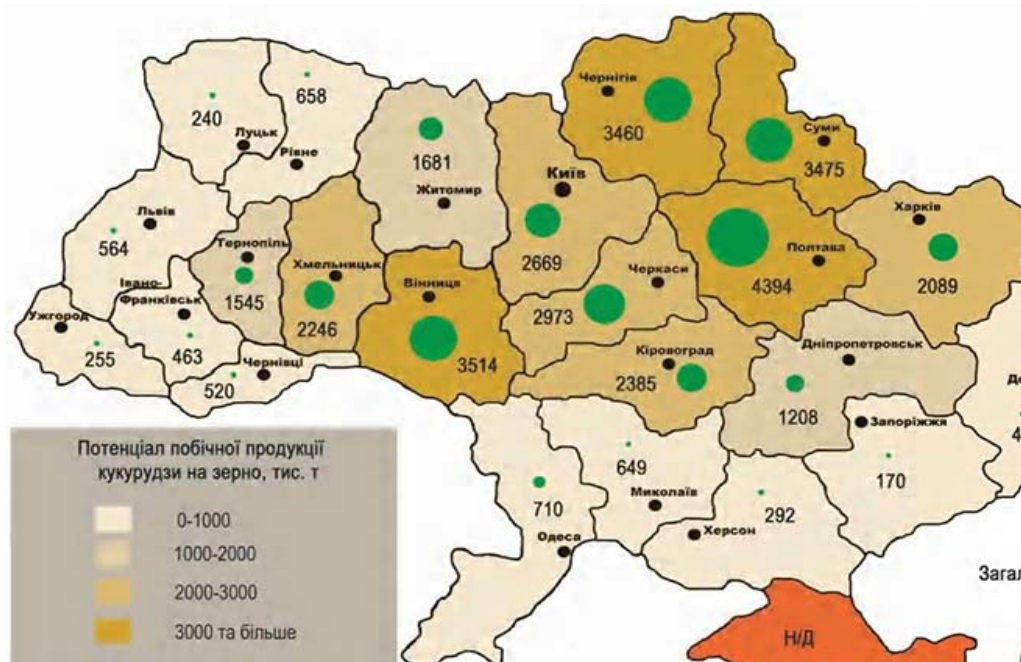


Рисунок 2 – Потенціал побічної продукції пожнивних решток кукурудзи

Джерело: [7]

З побічних продуктів кукурудзи на зерно переважно виробляють тверді види біопалива: прямокутні і круглі тюки, гранули та брикети.

Важливими чинниками для забезпечення належної якості біомаси є правильно організовані технологічні операції та підібране і налагоджене обладнання. Також необхідно координувати плани виконання робіт збиральної кампанії із прогнозом погоди, що розробляється місцевими метеостанціями.

Втім, використання ПП кукурудзи на зерно для отримання енергії в Україні практикується давно, але у досить обмежених масштабах, переважно для виробництва теплової енергії для потреб приватних домогосподарств, хоча існує значна сировинна база для масштабного розвитку. Крім цього, необхідно визначити умови, при яких можливо відчувувати ПП з полів без шкоди для родючості ґрунтів. Значного досвіду раціонального використання пожнивних решток в Україні, якщо порівнювати з іншими країнами, немає. Зважаючи на зростаючі потреби в зерні кукурудзи (вирощування цукрової кукурудзи, розвиток тваринництва, експорт і т.д.), – призводить до утворення все більшої кількості рослинних решток, що певним чином починає створювати проблеми для фермерів. Збільшення кількості рослинних решток від вирощування кукурудзи на зерно спричиняє накопичення в ґрунті хвороб рослин, перешкоджає сівбі і стабільному розвитку рослин та викликає поглинання азоту. Тому відчуження частини ПП з високопродуктивного поля може навіть покращити пророщення, ріст та підвищити врожайність культур.

При спалюванні в котлах відмічається утворення більшого обсягу золи – 9,2% для стебел кукурудзи проти 2,6% для соломи інших зернових. Зола від спалювання ПП кукурудзи може бути використана як добриво в сільському господарстві та декоративному рослинництві. Національною академією аграрних наук України для АПК розроблені рекомендації із застосування соломи і післяжнивних решток як органічних добрив, тоді як спеціалізовані рекомендації із визначення можливості відчуження побічної продукції рослинництва поки що відсутні. Тому вітчизняні

агровиробники на власний розсуд визначають напрямки використання побічної продукції рослинництва, що часто не є раціональним, або спалюють її разом із стернею на полях, що завдає значної шкоди навколишньому середовищу, забруднюючи атмосферне повітря, та знищуючи корисну мікрофлору верхнього шару ґрунту.

Під час збирання врожаю зернозбиральним комбайном з кукурудзяною жаткою рослинні рештки перерозподіляються частково у стерні, за жаткою комбайна та за комбайном. Найбільший обсяг біомаси із стебел і листя утворюється за жаткою, що у вологому стані дорівнює 0,96 маси зерна.

Технологічні операції заготівлі пожнивних решток з послідуочим вивезенням із поля у загальному випадку передбачають подрібнення, розподілення та ущільнення біомаси. Відповідно до способів заготівлі ПП кукурудзи на зерно, можна виділити п'ять базових технологій. Крім цього, розподілену після зернозбирального комбайна ПП кукурудзи можна тюкувати, але є низькою ефективність підбирання залишків (25-30%), тому це економічно недоцільно. Використовуючи поєднання базових технологій можна забезпечити збирання певної кількості біомаси, чого важко досягнути при заготівлі соломи зернових колосових, сої та ріпаку з огляду на те, що вся ПП зосереджується за комбайном.

Також є значний потенціал накопичення стебел та кошиків соняшнику в рослинництві. Культура вкрай затребувана на внутрішньому і зовнішньому ринках, - олія, шрот реалізуються за високими цінами. Особливо цінується олія першого холодного віджиму, але це в основному експортний продукт, пересічним українцям більш доступною є екстрагована олія, яку отримують вторинним вилученням за допомогою гексанового розчинника.

Для використання ПП соняшнику як енергетичної сировини необхідно забезпечити правильні умови збирання. Якщо агрегат комбайн-жатка обладнано подрібнювачем, він зрізає стебла та вивантажує їх у полі невеликими копами. Якщо стебла залишаються на полі, використовують дискові лушпильники для оптимізації умов мінералізації даних решток.

Зважаючи на високий вміст вологи у стеблах соняшнику (власне обумовлений періодом збирання), дану продукцію доцільно використовувати для отримання біогазу. Спалювання може супроводжуватися засміченням обладнання котлоагрегатів олійними рештками. Тому виникає необхідність в додатковому просушуванні сировини та очищення обладнання під час використання пелетів із відходів соняшнику.

Рослинні відходи як паливо мають деякі негативні сторони. Рештки соломи та стебел можуть містити сліди мінеральних дорив та пестицидів, що при спалюванні поступають в атмосферу в зміненому вигляді. Також в соломі та стеблах може міститися хлор, лужні метали, калій, та ін., що спричиняє корозію обладнання котелень, забруднює довкілля. Тобто в окремих умовах необхідно розглядати необхідність установки додаткового очисного обладнання для запобігання забруднення атмосфери [8,11].

Вивчивши світовий досвід та вітчизняні здобутки в галузі освоєння ринку біопалива, – у «ФГ Гусака В.М.», що знаходиться в Кіровоградській області, та має переважним видом діяльності рослинництво з великою часткою зернових колосових, а також кукурудзи та соняшнику в сівозміні, – було прийнято рішення розпочати впровадження обладнання для здійснення технологічних операцій з виробництва твердого біопалива (паливних гранул) з рослинної біомаси сільськогосподарських культур за наступною схемою: велике подрібнення, сушка, дрібне подрібнення, зволоження, пресування, охолодження, фасування.

Крупне подрібнення виконують, укладаючи тюки або рулони соломи на планчасті рухомі транспортери та подають їх по мірі завантаження до дробарки. Великі дробарки подрібнюють сировину для подальшого сушіння. Процес подрібнення має забезпечити розміри частинок не більше 10 мм. Велике подрібнення дозволяє швидко і якісно підготувати сировину для сушки та до подальшої переробки в дрібній дробарці.

Оскільки зазвичай соломі зберігають у вигляді тюків або рулонів на відкритих майданчиках, то під дією атмосферного впливу початкові значення вологості соломи можуть змінюватися, що негативно впливатиме на процес її подрібнення. Відходи з вологістю більше 15% погано пресуються, особливо пресами з круглими матрицями. Крім цього, виготовлені паливні гранули з підвищеною вологістю не мають відповідних параметрів якості. Тому сировина перед пресуванням повинна мати вологість в межах від 8 до 12 %. Для отримання якісного продукту вологість повинна складати 10 ± 1 %.

З метою доведення вологості сировини до нормативних значень використовують сушарки барабанного або стрічкового типу. Вибір типу сушарки визначається видом сировини, вимогами до якості продукції і джерелом одержуваної теплової енергії. В технологічному процесі виробництва твердого біопалива сушка є найбільш енергоємним процесом.

Дрібне подрібнення обов'язкове, т. я. згідно з технологічними вимогами для пресування сировина повинна поступати фракціями з розмірами частинок до 4 мм. Для отримання якісного продукту насипна вага після подрібнення повинна складати $150 \text{ кг/м}^3 \pm 5\%$, а основний розмір часток не повинен перевищувати 1,5 мм. Для подрібнення сировини використовують молоткові дробарки, оскільки вони найбільше відповідають вимогам процесу подрібнення маси соломи сільськогосподарських культур.

Зволоження необхідне, оскільки сировина з вологістю менше 8% погано піддається «склеюванню» під час пресування, а готова продукція (паливні гранули) в процесі подальшого механічного впливу під час проведення робіт з фасування, навантаження, транспортування та ін. втрачає початкові габаритні розміри, подрібнюється та утворюються пилоподібні частини, що негативно впливає на її якість. Тому занадто суха маса має бути зволожена до нормативних значень вологості. Для проведення зволоження сировини використовують установку дозування води. Для проведення процесу зволоження сировини доцільно використовувати шнекові змішувачі, в яких вбудовані входи для подачі води або пари.

Процес пресування (гранулювання) може здійснюватися на пресах різних конструкцій з плоскою або циліндричною матрицею. При цьому діаметр матриці може бути більше метра, а потужність преса до 500 кВт, залежно від заданої продуктивності обладнання. Так само на продуктивність преса в межах 20% впливає розмір одержуваних паливних гранул. Паливні гранули діаметром до 6 мм виготовляють для приватного споживання, до 10 мм – для промислового. Речовиною, що природно пов'язує подрібнений матеріал у паливних виробках, є лігнін – аморфний полімер, який виділяється під дією тиску і температури і міститься у клітинах біомаси рослин.

Виконуються дані технологічні операції на лінії обладнання, встановленого на виробничому майданчику машинно-тракторного двора господарства.

Для обґрунтування доцільності переробки відходів рослинництва з подальшим використанням для власних потреб господарства, населення та реалізації, як приклад, приведемо розрахунок витрат на опалення будинку з розрахунковими тепловтратами 20 кВт загальною площею 200 м.кв при використанні різних енергоносіїв.

Будинок має тепловтрати 20 кВт – це розрахункове значення при зовнішній температурі -22°C .

Більше 90% часу протягом опалювального сезону тепловтрати нижче, і котел працює не на повну потужність. Тому при розрахунках загального споживання енергоносіїв за рік треба оперувати умовною цифрою 2100 год (згідно цього отримуємо, що протягом опалювального сезону тривалістю 6 міс. Робота котлів з частковим навантаженням еквівалентна 2100 год безперервної роботи з максимальною потужністю).

Всі розрахунки проводяться приблизно, з деякими спрощеннями. Витрата енергії на приготування гарячої води не враховується. Для будинку типової сучасної української сім'ї (120-200 м², 3-4 мешканців) орієнтовно він може становити 10-20% від загальних витрат на опалення.

Для будівель готельного типу, спорткомплексів і т.д. частка споживаної енергії на приготування гарячої води може бути значно вище.

Якщо опалення виконується на твердому паливі (гранули), тоді: орієнтовно 1 л рідкого палива по калорійності еквівалентний 2 кг гранул. На практиці калорійність гранул трохи нижче, тому згідно з європейськими норм їх вологість повинна бути не більше 12%, що в наших умовах не завжди дотримується (хоча вологість сильно підвищити не можна - гранули не будуть спресовуватися). Також в гранулах є домішки низькокалорійних деревних фракцій (кора, гілки і т.д.) і добавки типу соломи, лузги насіння і т.д..

Тоді приблизна витрата гранул на опалення приватного будинку за опалювальний сезон з урахуванням ККД спеціального котла 90-95% і більш високої вологості складе 9038 кг (збільшення витрати мінімум на 10% через підвищену вологість). При ціні гранул 2500 грн./т загальні витрати складуть: $9,038 \text{ т} * 2500 \text{ грн.} / \text{т} = 22595 \text{ грн.}$

Витрати на доставку і збереження у розрахунках не враховуються.

Якщо опалення традиційно виконується газом, то газовий котел, при розрахункових тепловтратах 20 кВт, витрачає на опалення приватного будинку протягом опалювального сезону при ККД 93% $(2,0 \text{ м}^3 / \text{г.} * 2100 \text{ год.}) / 0,93 = 4516 \text{ м}^3$.

В такому випадку витрати, з урахуванням тарифу на газ (з 1.11.18 р.) – 8,55 грн. / м³, складуть $4516 \text{ м}^3 * 8,55 \text{ грн./м}^3 = 38611 \text{ грн.}$ за опалювальний сезон.

Звісно, такий розрахунок не враховує багатьох супутніх витрат, але все одно свідчить про доцільність впровадження в приватних домогосподарствах більш економічного опалення. Зважаючи на екологічну доцільність переходу на новий вид палива, варто на базі кожного сільськогосподарського підприємства переробляти відходи рослинництва для отримання біопалива. Це єдиний раціональний шлях до збереження корисних копалин, стану довкілля та економії коштів.

Висновки. Сільське господарство є значним джерелом утворення рослинних решток. Солома та стебла утворюються щорічно, частково приорюються, певна кількість їх спалюється на полі. В господарствах, де ведеться рослинництво, впровадження обладнання для виробництва біопалива забезпечує виконання вимоги до раціонального використання біомаси відходів, та вирішується питання енергоносіїв. Тому подальші дослідження даного питання передбачають визначення шляхів збільшення рослинної біомаси відходів, оскільки певну частину їх необхідно повертати в ґрунт, а надлишок стає важливим резервом альтернативного біопалива, екологічно чистого та недорогого порівняно з традиційними енергоресурсами.

Список літератури

1. Голуб Г.А. Біоенергоконверсія органічної сировини агроценозів із забезпеченням енергетичної автономності виробництва. *Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві*. Запоріжжя, 2008. Вип. 3(3). С. 3-7.
2. Виробництво паливних брикетів з рослинних відходів. URL: <https://bio.ukrbio.com/ua/articles/6015/>
3. Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії, як альтернативні первинним джерелам в регіоні: зб. наук. статей п'ятої міжн. наук.-практ. конф. (м. Львів, 02–03 квітня 2009 р.). Львів: ЛьВЦНТЕУ, 2009. 353 с.
4. Енергетична оцінка агроєкосистем: навч. посіб. / О.Ф.Смаглій, А.С.Малиновський, А.Т.Кардашов та ін.; за ред. О.Ф.Смаглія. Житомир: ДАУ, 2002. 160 с.
5. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: підручник. Київ: НТУУ "КПІ", 2012. 489 с.
6. Кухарець С.М., Голуб Г.А. Забезпечення енергетичної автономності агроєкосистем на основі виробництва біопалива. *Вісн. Житомир. нац. агроєколог. ун-ту*, 2012. No 1, т. 1. С. 345–352.
7. Альтернативні джерела енергії. URL: https://pidruchniki.com/73013/ekologiya/kotli_alternativnih_paliv#14
8. Голуб Г.А., Таргоня В.С. Технічне забезпечення органічного виробництва сільськогосподарської продукції та біопалив. *Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві*. Запоріжжя: ІМТ НААН України, 2011. Вип. 2(8). 239 с.
9. Голуб Г.А. Техніко-технологічне забезпечення енергетичної автономності агроєкосистеми. *Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК*, 2010. Вип. 144, ч. 4. С. 303–312.
10. Биомасса как источник энергии : пер с. англ. / под ред. С.Соуфера, О.Забарски. Москва : Мир, 1985. 368 с.
11. Біоенергетичні системи в аграрному виробництві / Голуб Г.А. та ін.; за ред. Г.А. Голуба. Київ: НУБіП України, 2017. 229 с.

References

1. Holub, H.A. (2008). Bioenerhokonversiiia orhanichnoi syrovyny ahrotsenoziv iz zabezpechenniam enerhetychnoi avtonomnosti vyrobnytstva [Bioenergeonconversion of organic raw materials of agroecoses with the provision of energy autonomous production]. *Mekhanizatsiia, ekolohizatsiia ta konvertatsiia biosyrovyny u tvarynnytsvi*, 3(3), 3-7 [in Ukrainian].
2. Production of fuel briquettes from vegetable wastes [Production of fuel briquettes from vegetable wastes]. *bio.ukrbio.com*. Retrieved from <https://bio.ukrbio.com/ua/articles/6015/> [in Ukrainian].
3. Alternative and renewable sources of energy as alternatives to primary sources in the region: 5 mizhn. nauk.-prakt. konf. (m. L'viv, 02–03 kvitnia 2009 r.) – 5th International Scientific and Practical Conference. L'viv: LvTsNTEU [in Ukrainian].
4. Smahliij, O.F., Malynovs'kyj, A.S., Kardashov, A.T. (2002). Enerhetychna otsinka ahroekosystem: navch. posib [Energy assessment of agroecosystems]. O.F.Smahliia (Ed.). Zhytomyr: DAU [in Ukrainian].
5. Kudria, S.O. (2012). Netradytsijni ta vidnovliuvani dzherela enerhii: pidruchnyk []. Kyiv: NTUU "KPI" [in Ukrainian].
6. Kukharets', S.M., Holub, H.A. (2012). Zabezpechennia enerhetychnoi avtonomnosti ahroekosystem na osnovi vyrobnytstva biopalyva [Alternative and renewable energy sources]. *Visn. Zhytomyr. nats. ahroekoloh. un-tu*, 1, Vol. 1. 345–352 [in Ukrainian].
7. Al'ternatyvni dzherela enerhii. [Alternative Energy Sources]. *pidruchniki.com*. Retrieved from https://pidruchniki.com/73013/ekologiya/kotli_alternativnih_paliv#14 [in Ukrainian].
8. Holub, H.A., Tarhonia, V.S. (2011). Tekhnichne zabezpechennia orhanichnoho vyrobnytstva sil'skohospodars'koi produktsii ta biopalyv [Technical support of organic production of agricultural products and biofuels]. *Mekhanizatsiia, ekolohizatsiia ta konvertatsiia biosyrovyny u tvarynnytsvi*, Vol. 2(8), 239 [in Ukrainian].
9. Holub, H.A. (2010). Tekhniko-tekhnologichne zabezpechennia enerhetychnoi avtonomnosti ahroekosystemy [Technological and technological support of energy autonomy of agroecosystems]. *Nauk. visn. Nats. un-tu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Ser. Tekhnika ta enerhetyka APK*, Vol. 144, ch. 4, 303–312 [in Ukrainian].
10. Soufera, S., Zabarsky, O. (1985). *Biomass as a source of energy* (Trans.). Moscow: Myr [in Russian].
11. Holub, H.A., Kukharets', S.M., Marus, O.A. et al. (2017). Bioenerhetychni systemy v ahrarnomu vyrobnytstvi [Bioenergy systems in agricultural production], H.A. Holuba (Ed.), Kyiv: NUBiP Ukrainy [in Ukrainian].

Lyudmila Kolomiyets, Assoc. Prof., PhD agr. sci., **Martinenko Serhey**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Levitska Karina**, graduate student

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Estimation of Ways to Use Crop Production Waste

The purpose of the paper is to substantiate the necessity of recycling of secondary raw materials in agriculture, illumination of ways to use plant-based raw material waste as an alternative source of energy.

The agricultural sector of Ukraine is highly developed, therefore, a large amount of crop production waste is generated annually. The production of grain and leguminous crops in Ukraine is about 40-50 million tons per year. In addition to the part of the harvest, about the same amount of waste produced, or by-products of plant production. Therefore, in farms where the growing of groups of cultivated plants is actively carried out, the wide introduction of technological lines for the processing of cultivars and the formation of pellets, granules and others. types of biofuels that can be used in modern fuel systems, boilers, etc.

Having studied the world experience and domestic achievements in the field of development of the biofuel market, it is recommended to introduce equipment for the implementation of technological operations for the production of solid biofuels (fuel pellets) from plant biomass of agricultural crops according to the following scheme: large grinding, drying, fine grinding, moisturizing, pressing, cooling, packing.

Large shredding is performed by stacking bales or straw rolls on the flatbed moving conveyors and feeding them as loading to the crusher. Large crushers grind the raw material for further drying. The grinding process should ensure that the particles are not more than 10 mm in size. Large shredding allows you to quickly and qualitatively prepare the raw material for drying and further processing in a small crusher.

It was established that fuel raw material obtained from plant products does not cause significant pollution of the environment; is formed continuously; has a stable price, unlike traditional energy resources.

Thus, today agriculture is a significant source of biomass production of secondary vegetable raw materials. Further definition of ways to increase plant biomass waste is necessary, since a certain part of them must be returned to the soil, and the surplus becomes an important reserve of alternative biofuels.

crop production, straw, stems, by-products, bioconversion, briquettes, pellets, biofuels, energy, renewable energy sources

Одержано (Received) 12.12.2018

Прорецензовано (Reviewed) 18.12.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 631.363.2: 631.22:636.034 DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.164-170>

І.А. Велит, доц., канд. техн. наук

Полтавська державна аграрна академія, м. Полтава, Україна

Д.О. Бондаренко, інженер-механік

Господарство «Райс-Максимко» Полтавської області, м. Полтава, Україна

e-mail: Velit_Ira@ukr.net

Агрегат для плющення зерна в потоково-технологічних лініях кормоприготувального відділення молочної ферми

У статті представлено аналіз агрегатів для плющення зерна. Розглянуто вибір обладнання в технології процесу приготування кормів. Приведена технологічна схема кормоприготувального відділення молочної ферми. Проаналізовано використання агрегату для плющення зерна в потоково-технологічних лініях концентрованих кормів. Розглянута доцільність використання плющеного зерна в раціоні годівлі на тваринницьких фермах. Проаналізовано вплив способу обробки сухого зерна на надої корів, одержання якісного виробництва молочної продукції.

молочна ферма, раціон, потоково-технологічні лінії, агрегат для плющення зерна

© І.А. Велит, Д.О. Бондаренко, 2018

И.А. Велит, доц., канд. техн. наук

Полтавская государственная аграрная академия, г.Полтава, Украина

Д.А. Бондаренко, інженер-механік

Хозяйство «Райс-Максимко» Полтавской области, г.Полтава, Украина

Агрегат для плющения зерна в поточно-технологических линиях кормоприготовительного отделения молочной фермы

В статье представлен анализ агрегатов для плющения зерна. Рассмотрены выбор оборудования в технологи процесса приготовления кормов. Приведена технологическая схема кормоприготовительного отделения молочной фермы. Проанализировано использование агрегата для плющения зерна в поточно-технологических линиях концентрированных кормов. Рассмотрена целесообразность использования плющенного зерна в рационе кормления на животноводческих фермах. Проанализировано влияние способа обработки сухого зерна на надой коров при получении качественного производства молочной продукции.

молочная ферма, рацион, поточно-технологические линии, агрегат для плющения зерна

Постановка проблеми. Використання високопродуктивних і великовантажних машин на невеликих тваринницьких фермах економічно не вигідно. Збільшуються капіталовкладення і амортизаційні відрахування, а в багатьох випадках їх застосування обмежується розмірами приміщень, відсутністю спеціальних сховищ кормів, доріг з твердим покриттям і т.д. Крім того, обсяги робіт на тваринницьких фермах знижують коефіцієнт використання техніки, ускладнюють організацію робіт і закріплення кадрів. Тому перевага надається напряму, пов'язаного з використанням спеціальних, малогабаритних, енергоекономічних машин і комплектів обладнання для механізації трудомістких процесів, комплектації потоково-технологічних ліній на молочних фермах [1,2,3,6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До машин та обладнання для механізації тваринництва пред'являють особливі вимоги, оскільки машини і механізми безпосередньо впливають на живі організми та середовище, де протікають біологічні і фізіологічні процеси [5]. Щоб полегшити підготовку кормів до згодовування і поліпшити їх засвоєння організмом тварини на молочних фермах середніх розмірів використовують подрібнювачі зернових компонентів, грубих кормів, коренебुльбоплодів, а також універсальні для декількох видів корму. При використанні здрібненого зерна в якості корму тваринам, необхідно враховувати, що при високому ступені здрібнювання з наступними операціями транспортування, перевантаження і видачі в сухому виді, здрібнена маса порошить. У цьому випадку збільшуються втрати дорогого корму, а пил негативно впливає на здоров'я тварин, особливо молодняку.

Найбільший ефект від використання зерна злакових і бобових культур можна отримати при згодовуванні їх у складі комбікормів, збалансованих за поживними речовинами – протеїну, вітамінів і мікроелементів у відповідності з фізіологічними потребами тварин. На даний час в раціон годівлі на молочних фермах використовують плющене зерно. Нерівномірне дозрівання зерна не ускладнює його опрацювання. Використовуються зелені, дрібні і зруйновані зерна. Отримані в результаті плющення пластівці характеризуються зруйнованою внутрішньою структурою зерен, що сприяє більш легкому проникненню в них і дії шлункового соку в організмі тварин. Такий продукт характеризується високим ступенем засвоюваності, підвищується приріст тварин на відгодівлі і позитивно впливає на зростання надоїв молока. Плющенню піддається як вологе зерно, так і сухе, однак пластівці зі зволоженого зерна краще засвоюються організмом тварин.

Плющик може мати пасовий привід, два або три вальця для розплющення зерна [4]. Агрегат для плющення зерна з трьома робочими вальцями дозволяє одночасно плющить дрібні і великі зерна, наприклад, кукурудзу, боби, горох,

одночасно з вівсом, ячменем, пшеницею. Ширина першої щілини постійна, ширина другої щілини регулюється для отримання необхідної фракції. Зносостійкість робочих органів – вальців, в середньому, в два рази вище, ніж молотків у молоткових дробарках. Не потрібні швидкозношуючі елементи, такі як решета.

В господарствах країни використовують агрегати для плющення зерна вітчизняних та іноземних виробників. Наприклад, компанії «Аймо Кортео Конепайя» (Фінляндія), фірми «SOMMER», MAX Haussler, «Grinder Bagger» (Німеччина), Marcato Marga Mulino (Італія), Oldmill Crimper (Беларусь), ЧП «Агротехник», групокомпаній «Агрокіт» і т.д.

Вальцюві плющики ROmiLL M300, M600 [10] середнього та високого класу потужності, широко використовуються на тваринницьких фермах. Без додаткової технології вони забезпечують підготовку порцій корму на наступний день та створюють наявні резерви на кілька днів.

Зернові плющилки «Grinder Bagger» [7] забезпечують високоякісне плющення зернових і бобових культур вологістю від 25 до 40% з одночасним закладанням плющеного матеріалу в полімерні рукави завдовжки до 75 м. Продуктивність плющилок від 15 до 35 т/год, в поєднання з можливістю установки пакувальних виходів від 1,2 / 1,5 / 2,0 / 2,4 м. Можливість одночасного плющення і закладки в рукав дозволяє підібрати місце зберігання корму та заощадити час на його заготівлі. Вальці з канавки забезпечують якісне плющення зерна будь-якого розміру без руйнування його структури.

Зернові плющилки «Superior» [8] мають продуктивністю від 4 до 50 т/год, які можуть використовуватися на фермах з різною чисельністю поголів'я. Високоякісні агрегати для плющення зерна «Superior» забезпечують тривалий термін служби і високу надійність в експлуатації.

Плющилки зерна компанії «БіоМікс» [9] мають високу продуктивність (до 2,5т/год) при низькому енергоспоживанні. Наприклад, традиційна молоткова дробарка продуктивністю 2 т/год працює від двигуна 18,5...22 кВт, а плющилка з аналогічною продуктивністю споживає 4...7,5 кВт.

Агрегат для плющення зерна ПЗ-600 (рис.1) призначений для плющення зерна будь-якої культури. Засвоюваність отриманої маси підвищується на 30% порівняно з роздробленою. При роботі агрегату виключається запиленість приміщення. Не утворюється борошно, тим самим виключається руйнування білка. Менше споживання електроенергії порівняно з дробленням. Потужність електродвигуна – 7кВт. Продуктивність до 1000 кг/год. Агрегат простий в експлуатації.



Рисунок 1. – Плющилка для зерна ПЗ-600
Джерело: використано [10]



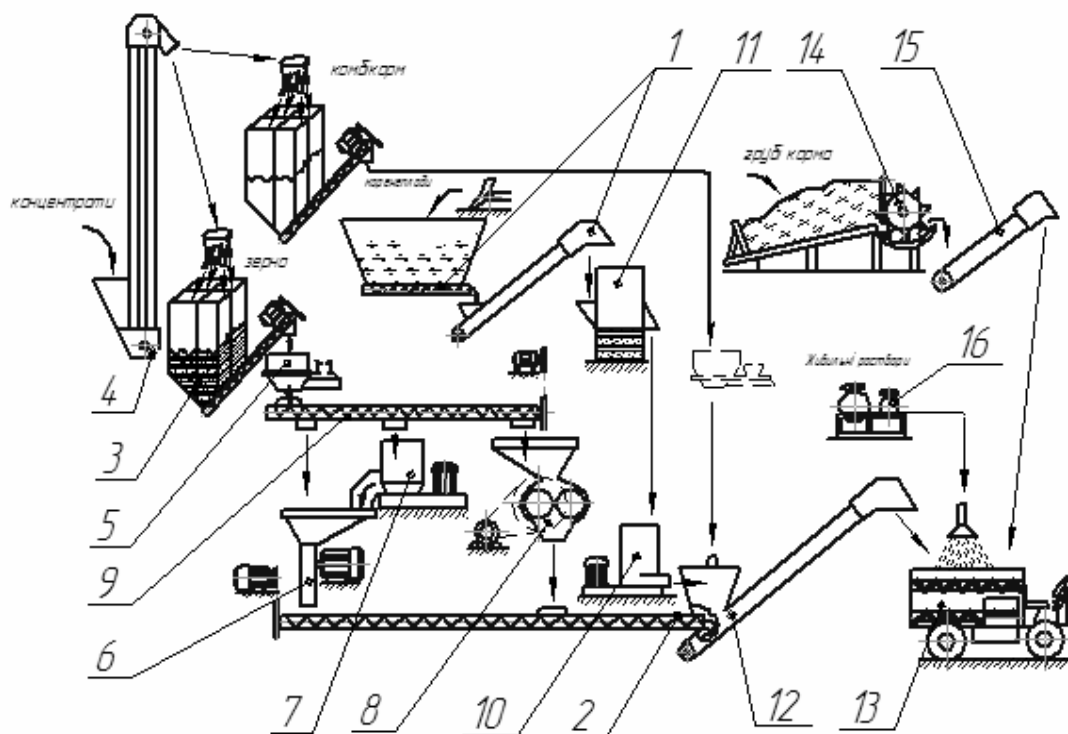
Рисунок 2 – Валкова-плющилка ВПК-150

Дробарка валкова-плющилка ВПК-150 (рис.2), призначена для дроблення і плющення зернових і бобових культур. Для додання зерну пластичності, іноді його зволожують, додаючи приблизно 20 частин води від ваги зерна і витримують протягом доби. Агрегат має продуктивність 100...150 кг/год, потужність електродвигуна 2,2 кВт.

Постановка завдання. Метою роботи є обґрунтування вибору обладнання в технології процесу приготування кормів на молочній фермі з використанням агрегату для плющення зерна, для збільшення якісного виробництва молочної продукції.

Методика експерименту. Визначення масової частки жиру у молоці проводилось кислотним методом Гербера відповідно до ГОСТ 5867-90. Визначення масової частки білка в молоці проводилось колориметричним методом відповідно до ГОСТ 25179-90.

Виклад основного матеріалу. З урахуванням набору кормів, що становлять раціони для ВРХ, розроблена технологічна схема кормоприготувального відділення молочної ферми (рис. 3) У ньому передбачені такі технологічні лінії: концкормів; коренеплодів; грубих кормів; поживних розчинів; змішування і роздачі кормів.



- 1 – транспортер коренеплодів ТК-5; 2 – шнек складальний ТУУ-2А; 3 – бункер концкормів БСК-10; 4 – норія НЦГ-10; 5 – бункер-ваговимірювач; 6 – дробарка зерна (типу «Таврія»); 7 – змішувач ЛС-1; 8 – плющилка зерна (типу ПЗ-Т-0,1) 9 – шнек розподільний ТУУ-2А; 10 – подрібнювач коренеплодів (типу КПИ-4); 11 – мийка коренеплодів з каменевловлювачем; 12,15 – транспортер типу ТС-40; 13 – змішувач-роздавач; 14 – живильник-подрібнювач грубих кормів ПЗМ-1; 16 – обладнання для розчинів

Рисунок 3 – Технологічна схема кормоприготувального відділення

Джерело: використано [2]

Лінія концкормів уключає норію НЦГ-10 (4, рис.3) із прийомним бункером, два модернізованих бункери БСК-10 (3), ємності яких поділені вертикальними перегородками на чотири відсіки з можливістю індивідуального вивантаження корму з

кожного відсіку, бункер-ваговимірювач (5) для відвантажування порції корму відповідно до рецепту раціону, розподільний шнек ТУУ-2А (9), змішувач лабораторний ЛС-1 (7), дробарка плющилка типу ПЗ-Т-01 (8) і шнек-змішувач збірний ТУУ-2А (2). Лінія коренебульбоплодів уключає транспортер коренебульбоплодів ТК-5 (1), мийку коренебульбоплодів з каменевловлювачем (11), подрібнювач типу КПІ-4 (10).

Набір обладнання лінії концентрованих кормів дозволяє виконувати операції: прийом, накопичення, зберігання кількох видів комбікорму або зернових культур; дозування выдачу готових комбікормів в лінію змішування; дозоване накопичення декількох видів зерна, змішування їх з наступним плющенням і транспортуванням отриманого корму на змішування з іншими компонентами.

На середніх молочних фермах до згодовування можна використовувати до 70...100 кг плющеного зерна на день залежно від продуктивності тварин і вмісту протеїну в зерні. Доповнюють протеїн за рахунок обробки суміші зернових і зернобобових культур. В плющеному ячмені підвищується вміст цукру в зерні в 1,7 рази, знижується вміст клітковини на 22,5%, а крохмалю – на 26%. Для дорослого стада в комбікорм вводять не менше 25% плющеного зерна, а для телят – 35%. Удій від згодовування такої суміші підвищується на 7...8 %, а в розрахунку на одну голову збільшився з 5950 кг до 6440 кг. Розглянуто вплив способу обробки зерна на надої, дані занесено в табл. 1.

Таблиця 1 – Вплив способу обробки зерна на надої

Параметри	Вид обробленого корму		
	Плющення	Подрібнене 10×10мм	Мелене і гранульоване
Молоко кг/день	23,0	20,4	19,8
4% молоко кг/день	22,7	20,9	19,9
Жири %	3,92	4,14	4,01
Виробництво жиру, г/день	904	955	792
Білок	3,04	2,96	3,08
Виробництво білка, г/день	701	615	614

Джерело: розроблено автором

Як видно з даних, приведених в табл. 1, надої молока збільшуються на 8% при використанні плющеного зерна. Жирність молока зменшилась на 5,4%, порівняно з використанням подрібненого зерна, а виробництво білка збільшилось на 14,3%.

Висновки. В залежності від конструктивного виконання агрегат для плющення зерна має продуктивність від 1 до 5 т/год і більше, працює на всіх видах зернових і бобових культур, не вимагає додаткового очищення зерна після комбайна, потужність на привід зерноплющилки від 1,5 до 12 кВт. Агрегат для плющення зерна може працювати, як від

3-х фазної, так і однофазної електричної мережі. Можливий привід від ВВП трактора. Зерноплющилка окупається від одного до п'яти місяців роботи, якщо враховувати тільки економію 10% зернової частини комбікорму з використанням плющеного зерна в порівнянні з подрібненим.

Використання агрегату для плющення зерна в потоково-технологічних лініях приготування кормів позитивно впливає на продуктивність тварин, якість молока, що особливо актуально в сучасних умовах господарювання.

Список літератури

1. Кухта К.О. Еволюція технологій та обладнання для приготування комбикормів – основа дослідження економічної ефективності кормовиробництва. *Технологический аудит и резервы производства*, 2013. № 6/3(14). С. 21–25.
2. Павленко В.А. Комплекс машин для механизации малых ферм: учеб.пособ. Киев: Укрживмаш, 1988. 185 с.
3. Резник Е.И. Малым фермам – современную кормоприготовительную технику. *Тракторы и сельскохозяйственное машиностроение*, 1985. № 6. С. 51–57.
4. П.А. Савиных, В.А. Казаков. Универсальная плющилка зерна. *Механизация, автоматизация и машинные технологии в животноводстве*, 2011. №4(4). С.59–63.
5. Скляр О.Г., Болтянська Н.І. Механізація технологічних процесів у тваринництві: навч. посібн. Київ: КолорПринт, 2012. 718с.
6. Ясенецький В.А., Павленко В.А., Невмержицький І.В. Механізація трудомістких робіт на малих фермах: навч.посіб. Київ : Урожай, 1990. 160 с.
7. Зерновые плющилки «Grinder Bagger». URL: <http://www.zapagro.ru/ru/catalog/91/106/>. / (дата обращения: 15.06.2009).
8. Зерновые плющилки «Superior». URL: <http://www.zapagro.ru/105/>. (дата обращения: 15.06.2009).
9. Как сделать кормление более эффективным, сэкономив при этом электроэнергию, место и время, необходимые для приготовления кормов. URL: <http://biomiks.opt.ru/shop/1499908.html>. (дата обращения: 15.06.2009).
10. Плющилки и комбикормовые заводы. Для средних сельскохозяйственных. URL: <http://eac-agro.ru/products/pljushchilki-i-kombikormovye-zavody>.

References

1. Kukhta, K. O. (2013). Yevolyutsiya tekhnologiy ta obladnannya dlya prigotovannya kombikormiv — osnova doslidzhennya yekonomichnoyi yefektivnosti kormovirobnitstva [Evolution of technologies and equipment for feed mixture preparation - the basis for the research of economic efficiency of feed production]. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva*. 6/3(14), 21-25 [in Ukrainian].
2. Pavlenko, V.A. (1988). Kompleks mashin dlya mekhanizatsii malykh ferm [Complex machines for the mechanization of small farms]. Kyiv: Ukrzhivmash[in Ukrainian].
3. Reznik, Ye.I. (1985). Malym fermam – sovremennuyu kormopriготовitel'nyuyu tekhniku [Small farms - modern feeding equipment]. *Traktory i sel'skokhozyaystvennoye mashinostroyeniye*, 6, 51–57. [in Russian].
4. Savinykh, P.A., .Kazakov, V.A (2011). Universal'naya plyushchilka zerna [Universal Grain Sweeper]. *Mekhanizatsiya, avtomatizatsiya i mashinnyye tekhnologii v zhivotnovodstve*, №4(4), 59–63.[in Russian].
5. Sklyar, O.G., Boltyans'ka, N.Í. (2012). Mekhanizatsiya tekhnologichnykh protsesiv u tvarinnitstvi: navch. Posibnik [Mechanization of technological processes in animal husbandry]. Kyiv: Kolor Print [in Ukrainian].
6. Yasenets'kiy, V.A., Pavlenko, V.A., Nevmerzhi'skiy, Í.V.(1990). Mekhanizatsiya trudomistkikh robót na malikh fermakh [Mechanization of labor-intensive work on small farms]. Kyiv : Urozhay [in Ukrainian].
7. Zernovyye plyushchilki «Grinder Bagger» [Grain conditioners "Grinder Bagger"]. *zapagro.ru*. Retrieved from <http://www.zapagro.ru/ru/catalog/91/106/>. / [in Russian].
8. Zernovyye plyushchilki «Superior» [Grain conditioners "Superior"]. *zapagro.ru*. Retrieved from <http://www.zapagro.ru/105/> [in Russian].
9. Kak sdelat' kormleniye boleye effektivnym, sekonomiv pri etom elektroenergiyu, mesto i vremya, neobkhodimyye dlya prigotovleniya kormov [How to make feeding more efficient, while saving energy, space and time required for the preparation of feed]. *biomiks.opt.ru*. Retrieved from <http://biomiks.opt.ru/shop/1499908.html> [in Russian].
10. Plyushchilki i kombikormovyye zavody. Dlya srednykh sel'skokhozyaystvennykh obshchestv [Plyushchilki and feed mills. For medium agricultural]. *eac-agro.ru/products*. Retrieved from <http://eac-agro.ru/products/pljushchilki-i-kombikormovye-zavody>. [in Russian].

IrynaVelit, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine

DenysBondarenko, engineer – mechanic

Farmstead "Rice-Maksymko" of Poltava region, Poltava, Ukraine

Aggregate for Rolling of Grain in Technological Lines of Feed Unit in the Dairy Farm

At this stage of livestock development, the preference is given to the direction associated with the use of special, small-scale, energy-efficient machines and sets of equipment for the mechanization of labor-intensive processes, complete set of flow-technological lines on dairy farms. Choppers of grain components are used to facilitate the preparation of feed for feeding and to improve their animal assimilation on medium-sized dairy farms. In the ration of feeding on dairy farms using rolling the grain. The resulting of crashed of flakes are characterized by the destruction of the internal structure of grains, which facilitates the easier penetration of them and the action of gastric juice in the body of animals. Such a product is characterized by a high degree of digestibility, an increase in the growth of animals on fattening and positively affects the growth of milk yield. The rolling grain is exposed both to wet grain and dry, but the flakes of the wet grain are better absorbed by the animal organism.

The purpose of the work is to substantiate the choice of equipment in the technology of the process of preparation of feed in a dairy farm using a unit for rolling the grain, increasing the production of dairy products.

The article presents the analysis of aggregates for the rolling of the grain. The choice of equipment in feed preparation technology is considered. The technological scheme of the feed unit of the dairy farm is presented. The use of the aggregate for rolling grain in flow-technological lines of concentrated feed is analyzed. The use of the aggregate for rolling grain in flow-technological lines of concentrated feed is analyzed. The expediency of use of rolling grain in the diet of feeding on livestock farms is considered. The influence of the method of processing dried grains on the livestock of cows, obtaining qualitative production of dairy products is analyzed.

Depending on the constructive design, the aggregate for rolling grain has a productivity of 1 to 5 t / h or more, works on all types of grain and legume crops, does not require additional cleaning of grain after the combine, the power of the rolling grain from 1.5 to 12 kW. The grain grinding unit may work like a grinder 3-phase, and single-phase electrical network. Possible drive from the shaft selection power of the tractor's. The aggregate for rolling of the grain saver pays off from one to five months of work, taking into account only the economy of 10% of the grain part of the compound feed with the use of rolling grain compared with the crushed.

The use of the aggregate for rolling of the grain in the flow-feed lines positively affects the productivity of animals, the quality of milk, which is especially relevant in modern conditions of farming.

dairy farm, ration, flow-technological lines, aggregate for rolling of the grain

Одержано (Received) 14.12.2018

Прорецензовано (Reviewed) 17.12.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 631.362.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.170-176>

Е. Б. Алієв, канд. техн. наук

Інститут олійних культур НААН, м.Запоріжжя, Україна

e-mail: aliev@meta.ua

Критерії оцінки якості процесу сепарації насіннєвої суміші

В результаті досліджень запропоновані узагальнюючі критерії якості виконання технологічного процесу сепарації насіннєвого матеріалу. Для технологічного процесу сепарації насіннєвої суміші, в результаті якого фракція компонента безперервно розподіляється вздовж лінії розроблено коефіцієнт розподілу. А для технологічного процесу сепарації, в результаті якого фракція компонента розподіляється дискретно, в якості узагальнюючого критерію прийнято сумарну концентрацію насіння проходу і сходу.

сепарація, якість, критерій, насіння, суміш, процес, оцінка

Э. Б. Алиев, канд. техн. наук

Институт масличных культур НААН, Запорожье, Украина

Критерии оценки качества процесса сепарации семенной смеси

© Е. Б. Алієв, 2018

В результате исследований предложены обобщающие критерии качества выполнения технологического процесса сепарации семенного материала. Для технологического процесса сепарации семенной смеси, в результате которой фракция компонента непрерывно распределяется вдоль линии разработан коэффициент распределения. А для технологического процесса сепарации, в результате которой фракция компонента распределяется дискретно, в качестве обобщающего критерия принято суммарную концентрацию семян прохода и схода.

сепарация, качество, критерий, семена, смесь, процесс, оценка

Постановка проблеми. Згідно діючого державного стандарту України ДСТУ 2240-93 [1] насіннєвий матеріал за сортовими та посівними якостями, визначаються, головним чином їх сортовою чистотою, яка повинна складати для елітного насіння (еліта, супереліта) – 99,6-99,9 %. Існуюче обладнання для виконання технологічних процесів очищення та розділення насіннєвої суміші до зазначеної сортової чистоти вимагає великих капітальних вкладень і значних питомих експлуатаційних витрат, що підвищує собівартість насіннєвого матеріалу.

Для доробки насіннєвого матеріалу батьківських компонентів гібридів, оригінального насіння – насіння первинних ланок насінництва (розсадник збереження лінії, розсадники випробування потомств першого та другого років – РВ-1, РВ-2, розсадник розмноження першого року – Р-1), необхідні більш досконалі технічні засоби. Для одержання однорідного генетичного насіннєвого матеріалу батьківських компонентів необхідно урахувати в комплексі всі ознаки, в тому числі ознаки сім'янки. Насіння має значне різноманіття щодо розміру, форми, об'ємної ваги та кольору. Довжина, ширина, товщина та об'ємна вага сім'янки – це кількісні ознаки, які впливають на продуктивність рослини [2, 3]. Для селекційного процесу забарвлення сім'янок, як маркерна ознака, відіграє вирішальну роль при ідентифікації відповідного сортозразка, що запобігає фальсифікації при продажі [4, 5].

Селекційно-насінницький процес вимагає застосування різноманітних сепараторів насіннєвого матеріалу, які не тільки очищають насіннєву суміш від органічних і неорганічних домішок, але й дозволяють групувати насіннєвий матеріал за фізико-механічними властивостями і морфологічними ознаками. Для оцінки якості виконання процесу сепарації насіннєвої суміші на сепараторах та насіннєвоочисних машинах і технічних засобах необхідно використовувати узагальнюючі критерії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відповідно до діючого державного стандарту України ДСТУ 4138-2002 [6] якість насіннєвого матеріалу визначають шляхом підрахунку домішок органічного і неорганічного походження, що дає змогу оцінити лише його чистоту. В дослідженнях [7] якість виконання технологічного процесу сепарації визначають шляхом оцінки фракційного складу очищеного насіннєвого матеріалу, що ускладнює порівняння якісних показників роботи сепараторів. В роботі [8] в якості критерію оцінки просіювання зерна використовують показник повноти просіювання, який визначається як відношення кількості (маси) домішок до загальної кількості (маси). Згідно досліджень [9, 10] ефективність очищення повноцінного зерна можна визначили аналітично базуючись на теорії ймовірності та з врахуванням початкового вмісту кожної з фракцій зернової суміші у вихідному матеріалі. Аналіз літературних джерел показав відсутність єдиного узагальнюючого і універсального критерію оцінки якості процесу сепарації насіннєвого матеріалу.

Постановка завдання. Таким чином, метою є розробка узагальнюючого критерію оцінки якості процесу сепарації насіннєвої суміші, який дозволяє проводити порівняльну оцінку роботи сепараторів.

Виклад основного матеріалу. Для встановлення узагальнюючого критерію оцінки якості процесу сепарації насінневої суміші необхідно математично вирішити технологічну задачу, яка полягає в розділенні зазначеної суміші на M фракцій за визначеними фізико-механічними або морфологічними властивостями її компонентів.

Введемо деякі поняття і визначення. Фракція суміші – фракція насінневої суміші, яка отримана в результаті її розділення за визначеними фізико-механічними або морфологічними властивостями. Фракція компонента – фракція, яка містить 100 % компонента, який відповідає визначеним фізико-механічними або морфологічними властивостями. При цьому до фракції суміші можуть входити різні фракції компонентів у різних співвідношеннях. До ідеальної фракції суміші входить єдина фракція компонента.

Розглянемо технологічний процес сепарації насінневої суміші, в результаті якого фракція компонента безперервно розподіляється вздовж лінії. До подібної сепарації відноситься розділення насінневої суміші за аеродинамічними властивостями на пневмосепараторах [11] і за об'ємною масою на пневмовібросталах [12]. При цьому в результаті розділення насінневої суміші, наприклад, під дією повітряного потоку розподіл кожної фракції компонента по довжині області може бути представлений нормальним розподілом із визначеним середнім $\bar{x}$ і середньоквадратичним відхиленням σ (рис. 1). Відомо, що для нормального розподілу в області $x \in [\bar{x} - 2\sigma; \bar{x} + 2\sigma]$ спостерігається ймовірність 95,45 %.

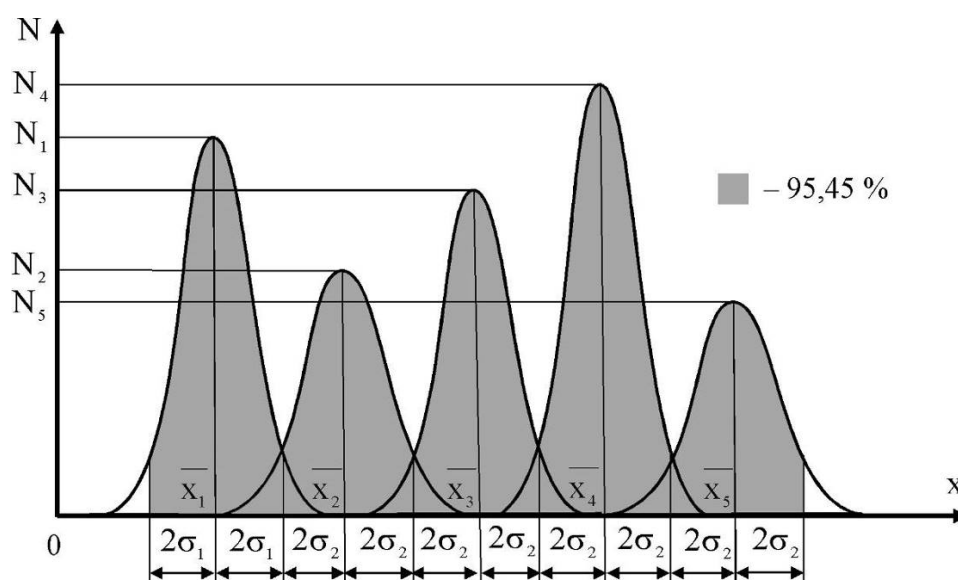
Відповідно до рисунку 1 найкраще розділення (95,45 %) досягається при умові:

$$2\sigma_1 + 2(2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4) + 2\sigma_5 \leq \bar{x}_5 - \bar{x}_1, \quad (1)$$

або

$$\theta = \frac{\bar{x}_5 - \bar{x}_1}{2\sigma_1 + 2(2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4) + 2\sigma_5} \rightarrow \max. \quad (2)$$

де θ – коефіцієнт заповнення.



N – кількісний показник насінневої суміші (кількість насіння, маса або об'єм)

Рисунок 1 – Функції нормального розподілу кожної фракції компонента по довжині області
Джерело: розроблено автором

Вищезазначені коефіцієнт заповнення θ , середні значення розподілу фракцій по довжині $\bar{x}$ і їх середньоквадратичні відхилення σ характеризують розміри і розташування забірних областей (забірників) фракцій суміші. Однак зазвичай у існуючих сепараторах застосовуються забірники однакових незмінних розмірів, що ускладнює оцінку якості процесу сепарації.

Тому введено ще один критерій якості розподілу фракцій суміші в забірниках – коефіцієнт розподілу δ , який визначається наступним чином. Нехай вхідну насінневу суміш необхідно розділити на M фракцій суміші, тоді кількість забірних областей повинно дорівнювати M . Для кожної забірної області визначається фракційний склад насінневої суміші, який математично можна представити у вигляді квадратної матриці M фракцій суміші $\times M$ фракцій компонентів:

$$\begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1M} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{M1} & w_{M2} & \dots & w_{MM} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де w_{ij} – частка фракції компонента i в фракції суміші (забірнику) j :

$$w_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M N_{ij}} \cdot 100\%; \quad (4)$$

N_{ij} – кількісний показник (кількість насіння, маса або об'єм) фракції компонента i в фракції суміші (забірнику) j .

Коефіцієнт розподілу δ визначається як найбільша сума діагональних елементів матриці (3):

$$\delta = \max \left(\sum_{k=1}^M w_{kk}, \sum_{k=1}^M w_{k(k+1)}, \dots, \sum_{k=1}^M w_{k(k+M-1)}, \sum_{k=1}^M w_{(k+1)k}, \dots, \sum_{k=1}^M w_{(k+M-1)k} \right); \quad (5)$$

де k – натуральне число.

Розглянемо технологічний процес сепарації насінневої суміші, в результаті якого фракція компонента розподіляється дискретно. До подібної сепарації відноситься розділення насінневої суміші за геометричними розмірами на віброрешітних сепараторах [13] і за забарвленням на фотоелектронних сепараторах [14]. Дискретний розподіл фракцій суміші можна розглядати, як двофракційну сепарацію. Розглянемо даний технологічний процес на прикладі віброрешітного сепаратора, який дозволяє розділити насінневу суміш за геометричними розмірами (рис. 2).

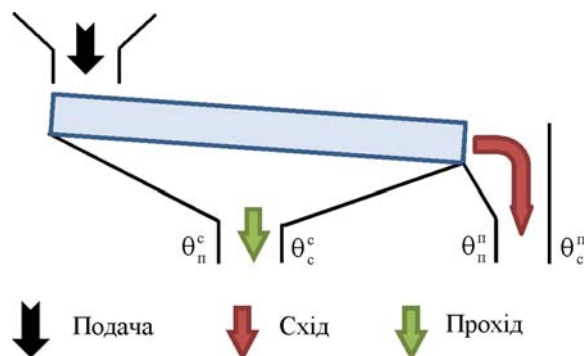


Рисунок 2 – Двофракційна сепарація насінневої суміші на віброрешітному сепараторі
Джерело: розроблено автором

Досліджувалася концентрація кожної фракції компонента в фракціях суміші, що відбилося від поверхні решета (схід) θ^c та пройшло крізь нього (прохід) θ^n . Необхідною умовою якісного розділення насінневої суміші є мінімізація значень концентрацій фракцій неліквідного компонента (сходу) за проходом (θ_c^n) і фракцій неліквідного компонента (проходу) за сходом (θ_n^c). Тому критерієм оцінки якості процесу сепарації насінневої суміші прийнято сумарну концентрацію насіння проходу і сходу, яка розраховується за формулою:

$$\theta = \theta_c^n + \theta_n^c. \quad (6)$$

Висновки. В результаті досліджень запропоновані узагальнюючі критерії якості виконання технологічного процесу сепарації насінневого матеріалу. Для технологічного процесу сепарації насінневої суміші, в результаті якого фракція компонента безперервно розподіляється вздовж лінії розроблено коефіцієнт розподілу. А для технологічного процесу сепарації, в результаті якого фракція компонента розподіляється дискретно, в якості узагальнюючого критерію прийнято сумарну концентрацію насіння проходу і сходу.

Список літератури

1. ДСТУ 2240-93. Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови. [Чинний від 1993-09-09]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України. 1993. 74 с.
2. Петренко В. П., Кривошеєва О. В., Леонова Н. М. Створення високобілкових ліній соняшнику для кондитерського напрямку селекції. *Сучасні технології селекційного процесу сільськогосподарських культур: тези міжн. наук. симпозіуму (7-8 лип. 2004 р.)*. УААН, Ін-т рослинництва ім. В.Я. Юр'єва. Харків. 2004. С. 138-139.
3. Леонова Н. М., Кириченко В. В., Сивенко А. А. Проявление эффекта гетерозиса и комбинационная способность линий подсолнечника кондитерского типа. *Масличные культуры : научно-технический бюллетень Всероссийского 19 научно-исследовательского института масличных культур*. Краснодар, 2015. Вып. 1 (161). С. 16-21.
4. Атлас морфологічних ознак сортів рослин соняшника однорічного *Helianthus annuus* L. Наочне доповнення до «Методики проведення інспектування насінницьких посівів соняшника однорічного». Київ: Алефа; Український інститут експертизи сортів рослин, 2011. 87 с.
5. Нікітчин Д. І. Соняшник. Київ: Урожай, 1993. 192 с.
6. ДСТУ 4138-2002. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. [Чинний від 2004-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України. 2002. 173 с.
7. Оценка качества очистки зерна на семяочистительной линии фирмы LMC. / Оробинский В.И. та ін. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*, 2015. № 4 (47). С. 93-97.
8. Ямпілов С. С. Технологическое и техническое обеспечение ресурсо-энергосберегающих процессов очистки и сортирования зерна и семян. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2003. 262 с.
9. Лещенко С. М., Сало В. М., Васильковский О. М., Богатирьев Д. В., Отт В. В. Аналітична оцінка якості пневмосепарації на основі алгоритму функціонування зерноочисних машин. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту*. 2012. Вип. 25, ч. I. С. 68-73.
10. Сало В. М., Лузан П. Г., Богатирьев Д. В. Технічне забезпечення підготовки зерна до зберігання: монографія. Кіровоград: СПД ФО Лисенко В.Ф., 2013. 148 с.
11. Aliev E.B., Yaropud V.M., Dudin V.Yr., Pryshliak V.M., Pryshliak N.V., Ivlev V. V. Research on sunflower seeds separation by airflow. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 56, No. 3. P. 119-128.
12. 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. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 54, No. 1. P. 95-104.
13. Shevchenko I. A., Aliev E. B. Research on the photoelectronic separator seed supply block for oil crops. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 54, No. 1. P. 129-138.
14. Shevchenko I., Aliiev E. Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. *Food Science and Technology*. 2018. Vol. 12. Issue 4. P. 135-142.

References

1. Nasinnya sil's'kohospodars'kykh kul'tur. Sortovi ta posivni yakosti. Tekhnichni umovy. [Seeds of agricultural plants. Varietal and sowing characteristics. Specifications.]. (1993). *DSTU 2240-93 from 09 September 1993*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy. 1993. 74 s [in Ukrainian].
2. Petrenkova V. P., Kryvosheyeva O. V., Leonova N. M. (2004). Stvorenniya vysokobilkovykh liniy sonyashnyku dlya kondyters'koho napryamku selektsiyi. Suchasni tekhnolohiyi selektsiynoho protsesu sil's'kohospodars'kykh kul'tur: zbirnyk tez mizhnarodnoho naukovoho sympoziumu (7-8 lyp. 2004 r.). UAAN, In-t roslynnytstva im. V.YA. Yur'yeva. Kharkiv [in Ukrainian].
3. Leonova, N.M., Kirichenko, V.V., Sivenko, A.A. (2015). Proyavleniye effekta geterozisa i kombinatsionnaya sposobnost' liniy podsolnechnika konditerskogo tipa. Maslichnye kul'tury [Manifestation of heterosis effect and combinability of confectionery-type sunflower lines. Oilseeds]. *Vserossiyskii 19 nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnykh kul'tur*. Krasnodar, Vol. 1 (161), 16-21 [in Russian].
4. *Atlas of morphological characteristics of varieties of sunflower seeds of the annual Helianthus annuus*. (2011). Kyiv: Alefa, Ukrayins'kyi instytut ekspertyzy sortiv roslin [in Ukrainian].
5. Nikitchyn, D. I. (1993). Soniashnyk [Sunflower]. Kyiv: Urozhaj [in Ukrainian].
6. Nasinnya sil's'kohospodars'kykh kul'tur. Metody vyznachennya yakosti [Seeds of agricultural plants. Methods of quality determination]. (2002). *DSTU 4138-2002 from 01 January 2001*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
7. Orobinskiy, V.I., Tarasenko, A.P., Chernyshov, A.V., Buravlev, N.Ye., Kharitonov, M.K. (2015). Otoskna kachestva ochistki zerna na semyaochistitel'noy linii firmy LMC [Evaluation of the quality of grain cleaning at the seed cleaning line of the company LMC]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 4 (47), 93-97 [in Russian].
8. Yampil' S. S. (2003). Tekhnolohichne i tekhnichne zabezpechennya resurso-enerhozberihayuchykh protsesiv ochyshchennya i sortuvannya zerna i nasinnya [Technological and technical support of resource-saving processes of cleaning and sorting grain and seeds]. Ulan-Ude: Vyd-vo VS-HTU [in Russian].
9. Leshchenko, S. M., Salo, V. M., Vasyliuk, O. M., Bohatyrov, D. V., Ott, V. V. (2012). Analitichna otsinka yakosti pnevmoseparatsiyi na osnove alhorytmu Funktsionuvannya zernoochysnu mashyn [Analytical estimation quality air cleaner on the basis algorithm of functioning grain cleaners]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiia*, Vol. 25, part. 1, 68-73 [in Ukrainian].
10. Salo, V. M., Luzan, P. H., Bohatyrov, D. V. (2013). Tekhnichne zabezpechennya pidhotovky zerna do zberihannya [Technical support for preparing grain for storage]. Kirovohrad: SPD FO Lysenko V.F. [in Ukrainian].
11. Aliev, E.B., Yaropud V.M., Dudin V.Yr., Pryshliak V.M., Pryshliak N.V., Ivlev V. V. (2018). Research on sunflower seeds separation by airflow. *INMATEH – Agricultural Engineering*, Vol. 56, No. 3, 119-128. [in English].
12. Aliev, E.B., Bandura, V.M., Pryshliak, V.M., Yaropud, V.M., Trukhanska, O.O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*, Vol. 54, No. 1, 95-104. [in English].
13. Shevchenko, I. A., Aliev, E. B. (2018). Research on the photoelectronic separator seed supply block for oil crops. *INMATEH – Agricultural Engineering*, Vol. 54, No. 1, 129-138. [in English].
14. Shevchenko, I., Aliiev, E. (2018). Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. *Food Science and Technology*, Vol. 12, Issue 4, 135-142. [in English].

Elchin Aliiev, PhD tech. sci.

Institute of Oilseed Crops NAAS, Zaporizhia, Ukraine

Criteria for Assessing the Quality of the Separation Process of Seed Mixture

The breeding and seeding process requires the use of a variety of seed separators that not only purify the seed mixture from organic and inorganic impurities, but also allow the seed material to be grouped according to the physical and mechanical properties and morphological features. To assess the quality of the separation of the seed mixture on separators and seed treatment machines and technical means, it is necessary to use generalizing criteria. The analysis of literary sources showed the absence of a single generalizing and universal criterion for evaluating the quality of the separation process of seed material. Thus, the goal is to develop a generalization criterion for assessing the quality of the separation process of the seed mixture, which allows a comparative evaluation of the work of separators.

Fraction of the mixture - a fraction of the seed mixture, obtained as a result of its separation by the specified physical-mechanical or morphological properties. The component fraction is a fraction containing 100% of the component that corresponds to certain physico-mechanical or morphological properties. In this case, the fraction of the mixture may include different fractions of components in different ratios. To the ideal fraction of the mixture is a single fraction of the component.

As a result of the research, generalization criteria of the quality of the seed process separation process are proposed. For the technological process of seed separation separation, in which the fraction of the component is continuously distributed along the line, a distribution coefficient is developed. And for the technological process of separation, in which the fraction of the component is distributed discretely, as a generalization criterion, the total concentration of seeds of the passage and east is taken.

separation, quality, criteria, seeds, mixture, process, evaluation

Одержано (Received) 4.12.2018

Прорецензовано (Reviewed) 10.12.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 631.362

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.176-183>

О.М. Васильковський, доц., канд. техн. наук, **С.М. Лещенко**, доц., канд. техн. наук, **С.М. Мороз**, доц., канд. техн. наук, **Д.І. Петренко**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна

e-mail: olexa74@ukr.net

Дослідження енергоємності холостого ходу відцентрового сепаратора зерна

У статті описано результати досліджень показників енергоємності роботи оригінального інерційного прямоточного сепаратора зерна оснащеного лопатевим ротором. Теоретичний аналіз дозволив встановити, що однією зі складових потужності холостого ходу є коефіцієнт пропорційності, який враховує енергетику внутрішніх процесів. Проведені експериментальні дослідження дозволили отримати залежності приводної потужності та коефіцієнту пропорційності від параметрів лопатевого ротора відцентрового прямоточного сепаратора зерна в режимі холостого ходу.

відцентровий сепаратор, лопатевий ротор, зерно, енергоємність, потужність, коефіцієнт пропорційності

А.М. Васильковский, доц., канд. техн. наук, **С.Н. Лещенко**, доц., канд. техн. наук, **С.Н. Мороз**, доц., канд. техн. наук, **Д.И. Петренко**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Исследование энергоёмкости холостого хода центробежного сепаратора зерна

В статье описаны результаты исследований показателей энергоёмкости работы оригинального инерционного прямоточного сепаратора зерна оснащенного лопастным ротором. Теоретический анализ позволил установить, что одной из составляющих мощности холостого хода является коэффициент пропорциональности, учитывающий энергетику внутренних процессов. Проведенные экспериментальные исследования позволили получить зависимости приводной мощности и коэффициента пропорциональности от параметров лопастного ротора центробежного прямоточного сепаратора зерна в режиме холостого хода.

центробежный сепаратор, лопастной ротор, зерно, энергоёмкость, мощность, коэффициент пропорциональности

Постановка проблеми. Післязбиральне очищення є важливим етапом підготовки до переробки та зберігання зерна. Воно здійснюється переважно пневморешітними зерноочисними машинами, які забезпечують відокремлення компонентів зернової маси за аеродинамічними властивостями та розмірами.

Ефективність роботи зерноочисних машин оцінюється технологічними, експлуатаційними та іншими показниками, які впливають на кінцеву собівартість основної продукції – зерна. Великий вплив на останню здійснює такий експлуатаційний показник як енергоємність процесу сепарації або потужність, необхідна для приводу робочих органів, визначеність якої дозволяє конструкторам зерноочисної техніки прогнозувати споживання енергії і безпомилково виконувати інженерні розрахунки, обираючи потрібні характеристики двигунів.

На сьогоднішній день відомі робочі органи зерноочисних машин вже є досить вивченими з позиції енергетики, мають достатнє теоретичне обґрунтування і велику експериментальну статистику, однак створення принципово нових конструкцій вимагає проведення додаткових досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Удосконаленню ірізностороннім дослідженням робочих органів зерноочисних машин присвячено праці багатьох вчених [1-9].

Основними задачами, що вирішувалися дослідниками – підвищення показників технологічної ефективності та надійності роботи гравітаційних і відцентрових решітних сепараторів, при цьому дослідженню енергетики їх роботи приділено недостатньо уваги. Це пояснюється тим, що основні енергетичні показники функціонування базових конструкцій гравітаційних і інерційних сепараторів досліджені раніше [10-12], а виконані дослідниками удосконалення мають несуттєвий вплив на потужність, необхідну для приводу.

На кафедрі сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету було створено оригінальну конструкцію відцентрового прямооточного сепаратора зерна [13-15], яка дозволяє здійснювати пневморешітне очищення зерна і має високі показники технологічної ефективності. Основою створеної конструкції є багатофункціональний робочий орган – лопатевий ротор (рис.1), який одночасно виконує кілька операцій. Він створює повітряний потік який використовується для пневмосепарації, прискорює зерно, переміщуючи його по решету, очищує робочі канали останнього і сприяє виведенню сходової фракції з машини.



Рисунок 1 – Лопатевий ротор відцентрового прямооточного сепаратора зерна
Джерело: розроблено автором

В результаті патентного пошуку, світових чи вітчизняних аналогів даній конструкції не виявлено.

В ході проведення теоретико-експериментальних досліджень були встановлені основні технологічні показники роботи дослідного сепаратора [16], однак його енергетичні характеристики досліджені не в повній мірі.

Постановка завдання. Таким чином, зважаючи на викладене вище, актуальною задачею є виявлення складових потужності, зокрема у режимі холостого ходу, на привід запропонованого сепаратора і встановлення їх залежностей від конструктивних параметрів лопатевого ротора.

Виклад основного матеріалу. Енергоємність сепаратора у режимі холостого ходу будемо оцінювати потужністю, необхідною для приводу лопатевого ротора.

Потужність холостого ходу N_1 витрачається на подолання шкідливих опорів – тертя в підшипникових опорах та створення повітряного потоку. Вона змінюється в залежності від кутової швидкості обертання лопатевого ротора за емпіричним рівнянням М.М. Летошнева, яке виведене на основі теорії барабану В.П. Гарячкіна

$$N_1 = A \cdot \omega + B \cdot \omega^3, \quad (1)$$

де A та B – дослідні коефіцієнти; ω – кутова швидкість лопатевого ротора, с^{-1} .

Коефіцієнт A дорівнює моменту сил тертя в опорах:

$$A = P \cdot f \cdot \frac{d}{2}, \quad (2)$$

де P – сума реакцій на опорах, Н;

f – коефіцієнт тертя в опорах;

d – діаметр підшипникових опор, м.

Коефіцієнт B характеризує аеродинамічну дію лопатевого барабану і, може бути обчисленим за формулою:

$$B = Y^2 \cdot \frac{\rho \cdot F \cdot k \cdot r}{2 \cdot g}, \quad (3)$$

де Y – коефіцієнт пропорційності;

ρ – густина повітря, кг/м^3 ;

F – лобова площа лопаті, м^2 ;

k – кількість лопатей;

r – відстань від геометричного центру лопаті до вісі обертання, м.

Поряд з відомими, до складу рівняння (3) входить коефіцієнт пропорційності Y , величину якого необхідно встановити експериментально.

Вирішення поставленої задачі здійснювали на лабораторній експериментальній установці. Лопатевий ротор отримував крутний момент від електродвигуна. Зміну його частоти обертання здійснювали за допомогою варіатора. Потужність на привід ротора вимірювали контрольно-вимірювальним приладом К50.

Загальна потужність, холостого ходу N_1 визначалась без подачі на решето матеріалу при частотах обертів n лопатевого ротора 900 об/хв., 1100 об/хв., 1300 об/хв. і 1500 об/хв., що відповідають значенням кутових швидкостей відповідно ω 94 рад/с, 115 рад/с, 136 рад/с та 157 рад/с.

Коефіцієнт пропорційності Y необхідний для теоретичного визначення аеродинамічної складової потужності (3) знаходили за методикою, описаною нижче.

Потужність N'_1 , що витрачається на подолання сил опору повітря лопатевим ротором дорівнює

$$N'_1 = N_1 - N''_1, \quad (4)$$

де N''_1 – покази ватметра при холостому ході зі знятим лопатевим ротором.

Таким чином дослідний коефіцієнт B знайдеться за виразом

$$B = \frac{N'_1}{\omega^3}. \quad (5)$$

Вираз для визначення коефіцієнту пропорційності Y матиме вигляд

$$Y = \sqrt{\frac{2 \cdot N'_1 \cdot R}{\omega^3 \cdot \rho \cdot F \cdot k \cdot r}}. \quad (6)$$

Значення коефіцієнту пропорційності визначали експериментально для кутових швидкостей ω – 94 рад/с, 115 рад/с, 136 рад/с та 157 рад/с при різних кількостях лопаток ротору k – 24, 18, 12 та 6.

Обробка всіх експериментальних даних здійснювалась за загальноприйнятою методикою [17].

На рис. 2 наведено залежність аеродинамічної складової $N'_1 = B \cdot \omega^3$ потужності холостого ходу N_1 , що витрачається на додання шкідливих опорів (при подачі $Q = 0$) при різних показниках кінематичного режиму для роторів шириною 100 мм, з зовнішніми діаметрами 250 мм, що мають різну кількість (24, 18, 12 та 6) щіткових лопаток.

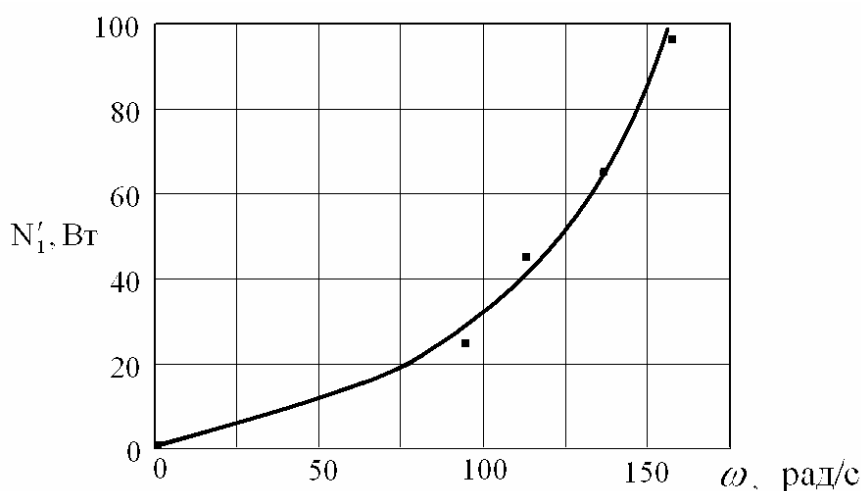


Рисунок 2 – Залежність аеродинамічної складової потужності від режиму роботи сепаратора
Джерело: розроблено автором

З отриманої залежності видно, що аеродинамічна складова потужності холостого ходу при зростанні показника кінематичного режиму зростає параболічно. Крім того, досліди показали, що кількість лопатей ротору в дослідженому інтервалі K фактично не впливає на аеродинамічну складову потужності. Однак, оскільки параметр «кількість лопатей ротора k » входить до розрахункової формули з визначення аеродинамічної складової потужності (3), то незмінність складової N'_1 при

різних кількостях лопатей забезпечується зміною величини коефіцієнту пропорційності Y .

На рис. 3 наведені залежності коефіцієнту пропорційності Y від показника кінематичного режиму роботи сепаратора для різної кількості лопатей.

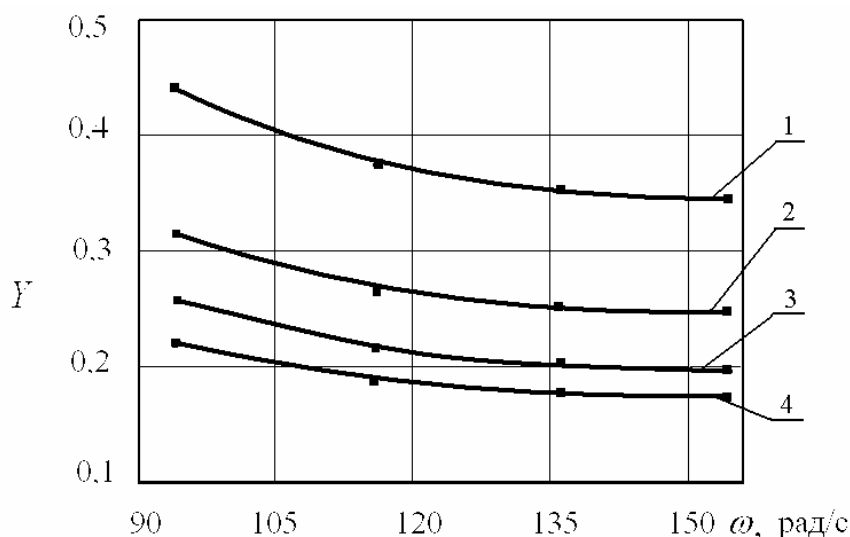


Рисунок 3 – Залежності коефіцієнту пропорційності від кутової швидкості обертання ротора з кількістю лопатей: 1 – $k=6$, 2 – $k=12$, 3 – $k=18$, 4 – $k=24$

Джерело: розроблено автором

Висновки. На основі проведення експериментальних досліджень вдалося встановити наступне.

1. Потужність холостого ходу відцентрового сепаратора зерна зростає параболічно зі збільшенням кутової швидкості лопатевого ротора, при цьому кількість лопатей на потужність не впливає.

2. Коефіцієнт пропорційності, що характеризує потужність у режимі холостого ходу зменшується зі зростанням кутової швидкості обертання ротора. Збільшення кількості лопатей також зменшує значення коефіцієнту пропорційності.

Список літератури

1. Резниченко М.Я. Цилиндрические барабаны зерноочистительных машин. Москва: Машиностроение, 1964. 216 с.
2. Васильковский М.И. Повышение эффективности сепарации зерна на быстровращающемся цилиндрическом решете: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Воронеж, 1987. 24с.
3. Комаристов В.Ю., Петренко М.М. Довідник з механізації післязбиральної обробки зерна. Київ: Урожай, 1990. 194 с.
4. Котов Б.І., Степаненко С.П., Пастушенко М.Г. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерно матеріалів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* Кіровоград, 2003. Вип. 33. С.53-59.
5. Півень М.В. Обоснование процесса сепарирования зерновых смесей плоскими вибрационными решетками. *Motrol.Commission of motorization and energetics in agriculture*. Lublin. 2015. Vol.17. №7. С. 163-169.
6. Тищенко Л.Н. та ін. Идентификация скорости прохождения частиц зерновой смеси через отверстия решет вибрационных зерновых сепараторов. *Восточноевропейский журнал передовых технологий*, Вып. 2(7). 2016. С.63-69.

7. Бакум М.В., Крекот М.М., Абдуєв М.М. Результаты досліджень впливу регулювальних параметрів на ефективність розділення насіннєвої суміші редиски пневматичним сепаратором з нахиленим каналом. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Сер. Механізація та автоматизація виробничих процесів*, 2016. Вип.10 (2). С. 67-71.
8. Завгородний А. И., Монтасер Х. Определение рациональной интенсивности колебаний рабочих органов вибросепаратора зерновых смесей. *Інженерія природокористування*, 2015. Вип. 1(3). С. 34-39.
9. Алієв Е. Б., Яропуд В. М. Фізико-математичний апарат руху насіння в повітряному потоці. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2017. №2 (97). С. 19–23.
10. Кожуховский И.Е. Зерноочистительные машины. Москва: Машиностроение, 1974. 200с.
11. Гладков Н.Г. Зерноочистительные машины. 2-е изд. перераб. и доп. Москва: Машгиз, 1961. 368с.
12. Тиц Э.Л. и др. Машины для послеуборочной поточной обработки семян. Москва: Машиностроение, 1967. 447 с.
13. Повітряно-решітний сепаратор. пат. 85117 Україна: МПК (2006) B07B 13/08, B07B 7/00, B02B 3/00. №а200703659; заявл. 03.04.2007; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24.
14. Nesterenko O. V., Leshchenko S. M., Vasylovskiy O. M., Petrenko D. I. Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. *INMATEH. Agricultural Engineering*. Romania. Bucharest: INMA. Vol. 53. No3. 2017. P. 65-70.
15. Мороз С.М. Васильковський О.М., Філімоніхін Г.Б. Анісімов О. В. Енергетичний аналіз роботи завантажувальних транспортерів зерноочисних машин загального призначення. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. Кіровоград. 2012. Вип. 42 (1). С. 106-116.
16. Васильковський О.М. та ін. Обґрунтування параметрів аспірації відцентрового пневморешітного сепаратора зерна. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* Кіровоград, 2011. Вип. 41 (2). С. 141-146.
17. Васильковський О., Лещенко С., Васильковська К., Петренко Д. Підручник дослідника: навч. посіб. для студ. агротехн. спец. Харків: Мачулін, 2016. 204 с.

References

1. Reznichenko, M. Ya. (1964). Tsilindricheskie barabanyi zernoochistitelnyih mashin [Cylindrical drums of grain cleaning machines]. M.: Mashinostroenie [in Russian].
2. Vasylovskiy, M. I. (1987). Povyishenie effektivnosti separatsii zerna na byistrovrashchayuschemsya tsilindricheskom reshete [Improving the efficiency of grain separation on a rapidly rotating cylindrical sieve]. avtoref. dis. na soiskanie nauch. stepeni kand. tehn. nauk. 05.20.01. Voronezh [in Russian].
3. Komaristov, V. Yu., Petrenko, M. M. (1990). Dovidnik z mehanizatsiyi pislyazbiralnoyi obrobki zerna [Handbook for mechanization of post-harvest grain processing]. K.: Urozhay [in Russian].
4. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., Pastushenko, M. H. (2003). Tendentsii rozvytku konstrukttsii mashyn ta obladnannia dlia ochyshchennia i sortuvannia zerno materialiv [Trends in the design of machinery and equipment for cleaning and sorting grain materials]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn. Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi naukovy-tekhnichnyi zbirnyk*, Vol. 33, 53-59 [in Ukrainian].
5. Piven, M. V. (2015.). Obosnovanye protsessa sepyrovaniya zernovikh smesei ploskymy vybratsyonnyimi reshetami [Justification of the process of separation of grain mixtures with flat vibrating sieves]. *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture*. Lublin, Vol.17 (7), 163-169 [in Russian].
6. Tyshchenko, L. N. et al. (2016). Ydentyfikatsiya skorosty prokhozhdennia chastyts zernovoi smesy cherez otverstiya reshet vybratsyonnykh zernovykh separatorov [Identification of the rate of passage of particles of the grain mixture through the openings of sieves of vibration grain separators]. *Vostochnoevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy*, Vol. 2 (7), 63-69 [in Russian].
7. Bakum, M. V., Krekot, M. M., Abduiev, M. M. (2016). Rezultaty doslidzhen vplyvu rehuliuvalnykh parametriv na efektyvnist rozdilennia nasinnievoi sumishi redysky pnevmatichnym sепаратором з нахиленим каналом [Results of research on the influence of the regulation parameters on the separation efficiency of the radish seed mixture by a pneumatic separator with a tilted channel]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Ser. Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychkykh protsesiv*, Vol. 10 (2), 67-71 [in Ukrainian].

8. Zavhorodnyi, A. Y., Montaser, Kh. (2015). Opredelenye ratsyonalnoi yntensyvnyosti kolebanykh rabochykh orhanov vybroseparatora zernovykh smesei [Determination of rational intensity of oscillations of working organs of vibroseparator of grain mixtures]. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*, Vol. 1(3), 34-39 [in Russian].
9. Aliyev, E. B., Yaropud, V. M. (2017). Fizyko-matematychnyi aparat rukhu nasinnia v povitriani pototsi [Physics and mathematical apparatus of movement of seeds in air flow]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK. Engineering, power engineering, transport of agroindustrial complexes*, Vol. 2 (97), 19-23 [in Ukrainian].
10. Kozhukhovskiy, Y. E. (1974). Zernoochystitelnye mashyny [Grain Cleaning Machines]. Moscow: Mashynostroeniye [in Russian].
11. Hladkov, N. H. (1961). Zernoochystitelnye mashyny [Grain Cleaning Machines]. 2-e yzd. pererab. y dop. Moscow: Mashhyz [in Russian].
12. Tits, E.L. et al. (1967). Mashyny dlya posleuborochnoy potochnoy obrabotki semyan [Machines for post-harvesting seed treatment]. Moscow: Mashynostroenie [in Russian].
13. Povitriano-reshitnyi separator [Air-lattice separator]. pat. 85117 Ukraina: MPK (2006) B07B 13/08, B07B 7/00, B02B 3/00. №a200703659; zaiavl. 03.04.2007; opubl. 25.12.2008, Biul. № 24 [in Ukrainian].
14. Nesterenko, O. V., Leshchenko, S. M., Vasylovskiy, O. M., Petrenko, D. I. (2017). Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. *INMATEH. Agricultural Engineering*. Romania. Bucharest: INMA, Vol. 53 (3), 65-70 [in English].
15. Moroz, S. M., Vasylovskiy, O. M., Filimonikhin, H. B., Anisimov, O. V. (2012). Enerhetychnyi analiz roboty zavantazhuvalnykh transporteriv zernoochysnykh mashyn zahalnoho pryznachennia. [Power analysis of the work of the loading conveyors of general cleaning machines]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn. Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi naukovo-tekhnychnyi zbirnyk*, Vol. 42 (1), 106-116 [in Ukrainian].
16. Vasylovskiy, O. M. et al. (2011). Obgruntuvannia parametriv aspiratsii vidtsentrovoho pnevmoreshitnoho separatora zerna [Substantiation of aspiration parameters of a centrifugal pneumatic razet grain separator]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn. Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi naukovo-tekhnychnyi zbirnyk*, Vol. 41 (2), 141-146 [in Ukrainian].
17. Vasylovskiy, O., Leshchenko, S., Vasylovska K., Petrenko, D. (2016). Pidruchnyk doslidnyka. Navchalnyi posibnyk dlia studentiv ahrotekhnichnykh spetsialnostei [Tutorial of the researcher. A manual for students of agrotechnical specialties]. Kharkiv: Machulin [in Ukrainian].

Oleksii Vasylovskiy, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Leshchenko**, Assoc. Prof., PhD tech. Sci., **Sergiy Moroz**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Petrenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Investigation of the Energy Intensity of the Idle Speed of the Centrifugal Grain Separator

The article describes the results of studies on the energy intensity of the work of the original inertial direct-flow grain separator equipped with a spindle rotor.

An important part of the work of grain cleaning machines is the energy performance. They affect the cost of the final product. The energy of classical separators is sufficiently studied, but the creation of fundamentally new structures requires research. Therefore, the establishment of the power of the drive of the working bodies is an urgent task.

The construction of an original centrifugal direct-flow grain separator was created at the Department of Agricultural Engineering of the Kirovohrad National Technical University. The machine allows air and grinding of grain to be cleaned. It is based on an original blade rotor, which performs several functions - air flow, acceleration of grain, cleaning of sieve openings and unloading of a clean product. An important characteristic of the separator is the idle speed. The theoretical analysis allowed to establish that one of its components is the coefficient of proportionality, which takes into account the energy of internal processes. Solving the problem was carried out on a laboratory experimental installation. The conducted empirical studies allowed to obtain the dependence of the drive power and the coefficient of proportionality on the parameters of the shaft rotor of the centrifugal direct-flow grain separator in idle mode. In particular, the following is established. The idle speed of the centrifugal grain separator increases parabolic with an increase in the angular velocity of the blade rotor, while the number of blades does not affect the power. The coefficient of proportionality, characterizing power in idle mode, decreases with increasing angular rotor speed. Increasing the number of blades also reduces the value of the proportionality factor.

The obtained results will allow to calculate the parameters of centrifugal direct-current separators at the design stage and to evaluate the energy of already created machines. Determining other components of energy intensity requires further research

centrifugal separator, shovel rotor, grain, energy intensity, power, proportionality factor

Одержано (Received) 15.12.2018

Прорецензовано (Reviewed) 17.12.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 631.816.33

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.183-189>

В.А. Дейкун, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: viktor.deikun@gmail.com

Результати дослідження процесу роботи нового комбінованого робочого органа

За результатами проведених лабораторних досліджень процесу роботи експериментального комбінованого робочого органа оснащеного туконапрямником та розподільником для одночасного з основним безполицевим обробітком ґрунту внутрішньогрунтового внесення гранульованих мінеральних добрив з рівномірним їх розміщенням по площі в підлаповому просторі, встановлено технологічні та кінематичні параметри, які суттєво впливають на якість виконання технологічного процесу. Проведено оцінку впливу швидкості польоту гранул добрив на виході з туконапрямника, висоти розташування розподільника над поверхнею нижнього обрізу лапи, кута нахилу ребра призми та кута між її гранями на дальність поперечного польоту основної маси добрив та рівномірність їх розподілу за конструктивною шириною захвату.

Конструкція комбінованого робочого органа для внутрішньогрунтового внесення гранульованих мінеральних добрив обладнана пристроєм з обґрунтованими параметрами, який дозволяє спрямувати потік гранул добрив до точки їх контакту з гранями призми розподільника, після відбиття від якого вони спрямовуються у заданому напрямку.

Запропонований робочий орган дозволяє рівномірно розмістити встановлену дозу мінеральних добрив на необхідну глибину з одночасною їх заробкою, що дозволяє знизити енерговитрати на виконання технологічної операції.

добрива, туконапрямник, розподільник, оптимальні параметри, впливові фактори, критерії оптимізації, дальність польоту, концентрація добрив

В.А. Дейкун, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Результаты исследования процесса работы нового комбинированного рабочего органа

По результатам проведенных лабораторных исследований процесса работы экспериментального комбинированного рабочего органа, оборудованного туконапрямителем и распределителем для одновременного с основной безотвальной обработкой почвы внутрипочвенного внесения гранулированных минеральных удобрений с равномерным их размещением по площади в подлапном пространстве, установлены технологические и кинематические параметры, которые существенно влияют на качество выполнения технологического процесса. Произведена оценка влияния скорости полета гранул удобрений на выходе из туконапрямителя, высоты расположения распределителя над поверхностью нижнего обреза лапы, угла наклона ребра призмы и угла между ее гранями на дальность поперечного полета основной массы удобрений и равномерность их распределения по конструктивной ширине захвата.

© В.А. Дейкун, 2018

Конструкция комбинированного рабочего органа для внутріпочвенного внесения гранулированных минеральных удобрений оборудована устройством с обоснованными параметрами, которое позволяет направить поток гранул удобрений к точке их контакта с гранями призмы распределителя, после отражения от которого они направляются в заданном направлении.

Предложенный рабочий орган позволяет равномерно разместить установленную дозу минеральных удобрений на необходимую глубину с одновременной их заделкой, что позволяет снизить энергозатраты на выполнение технологической операции.

удобрения, туконапрямитель, распределитель, оптимальные параметры, влияющие факторы, критерии оптимизации, дальность полета, концентрация удобрений

Постановка проблеми. Розподіл гранул добрив на поверхні ґрунту в підлаповому просторі, після їх відбиття від поверхні розподільного пристрою, в значній мірі залежить від конструктивних параметрів та ряду значимих факторів.

Аналіз останніх досліджень. Внутрішньогрунтовий спосіб внесення добрив дозволяє більш раціонально використовувати задані дози мінеральних добрив, що знижує загальні витрати на виробництво продукції рослинництва. Застосування таких технологій стримується відсутністю відповідного технічного забезпечення. Тому обґрунтування параметрів універсального робочого органа для внутрішньогрунтового внесення мінеральних добрив є актуальною науково-практичною задачею.

Постановка завдання. З метою підвищення рівномірності розподілу гранул добрив по площі в підлаповому просторі стрічатої лапи на кафедрі сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету розроблено лабораторне обладнання для дослідження режимів роботи, геометричних параметрів комбінованого робочого органа та встановлення впливових факторів.

Виклад основного матеріалу. Для встановлення характеру впливу швидкості $V_{\text{пад}}$ гранул добрив на виході з туконапрямника, висоти розташування розподільника над поверхнею нижнього обрізу лапи h , кута нахилу ребра призми φ та кута між її гранями Θ на дальність поперечного польоту l_n'' основної маси добрив та рівномірність їх розподілу по конструктивній ширині захвату робочого органа [1, 2, 3, 4] використовували спеціальне лабораторне обладнання (рис. 1).

До його складу входить: штатив 1, дозуючий елемент (котушковий висівний апарат) 2, туконапрямник 3 для забезпечення транспортування гранул добрив до точки їх сходу, культиваторна лапа 4 зі стояком 5 та закріпленим на ньому розподільником 6. На площині нижнього обрізу лапи розміщується протвень 7 з вісьмома секторами шириною 4 см [3, 8, 9].

Дослідження проводили відповідно до методики планування експерименту. Послідовність виконання була наступною. В бункер з дозуючим елементом засипалася порція гранульованих добрив. Після приведення в дію котушки висівного апарату гранули добрив проходили шлях: туконапрямник, розподільник і потрапляли в протвень (рис. 2). Після цього добрива, які потрапляли в різні сектори протвєня, зважувалися окремо і результати заносилися в журнал [4].

Згідно з обраною гіпотезою забезпечення рівномірності розподілу добрив по ширині захвату робочого органа на даному етапі експериментальних досліджень інтерес представляли два проміжних параметри – дальність поперечного польоту гранул l_n'' та концентрація основної маси добрив M на даній відстані від осі робочого органа [3, 7, 10].

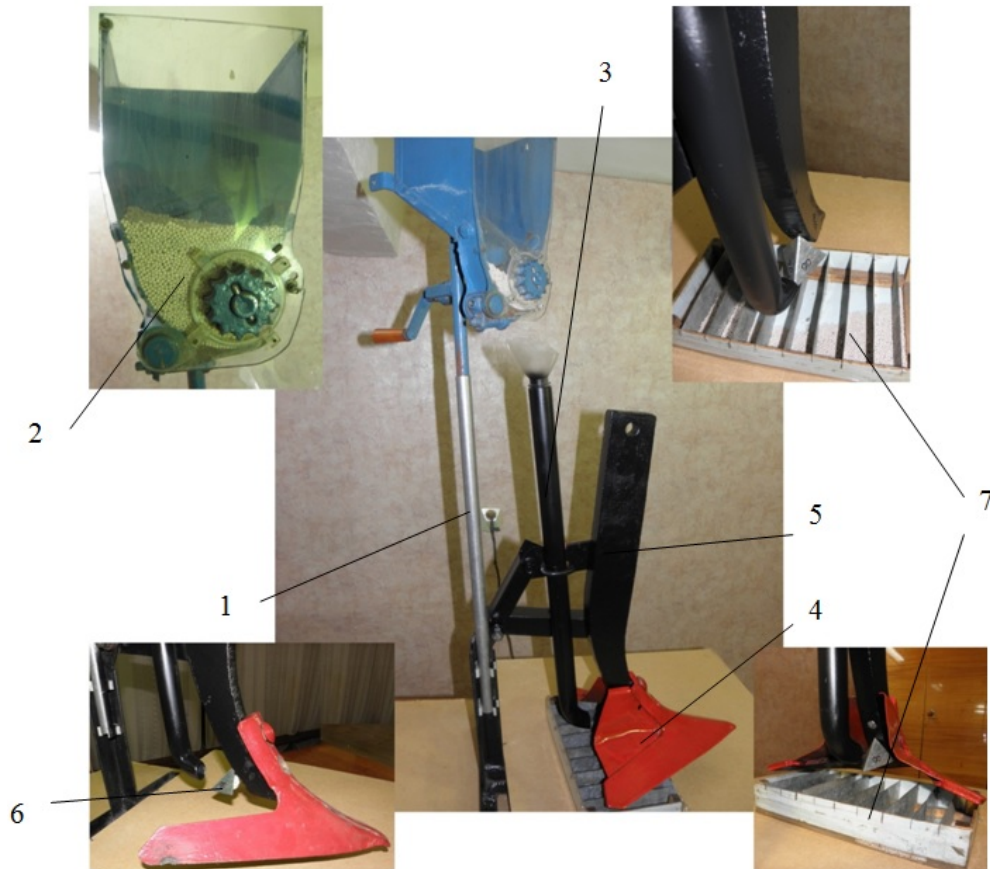
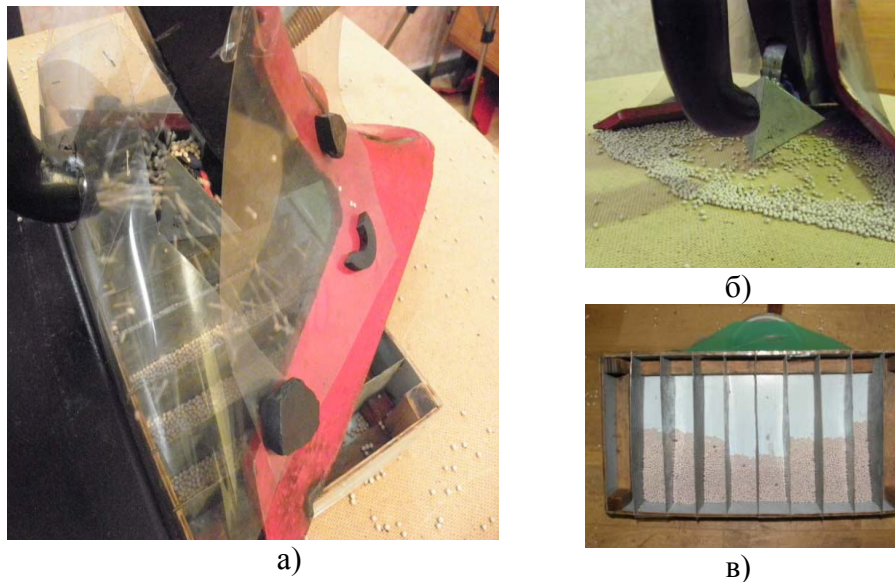


Рисунок 1 – Обладнання для дослідження процесу розподілу гранул мінеральних добрив по конструктивній ширині захвату робочого органа
Джерело: розроблено автором



а – загальний вигляд стаціонарної установки; б – розсів добрив на плоску поверхню;
в – розсів добрив у протвень

Рисунок 2 – Визначення рівномірності розподілу добрив в підлаповому просторі на стаціонарній установці
Джерело: розроблено автором

Реалізація матриці центрального композиційного плану 2^4 + зіркові точки дозволила встановити вплив основних факторів – швидкості польоту гранул добрив на виході з туконапрямника V_{nad} , кута нахилу ребра призми розподільника відносно горизонтальної площини φ° , кута між гранями призми Θ° , висоти поверхні відбивання відносно дна борозни h , на критерій оптимізації [4, 6, 10].

Необхідно зазначити, що вибрана схема подачі добрив у підлаповий простір та конструкція розподільника не дозволяють сформувати максимальну концентрацію матеріалу по центру робочого органа (рис. 3). Даний факт є більш позитивом ніж недоліком при підтвердженні правильності обраної гіпотези забезпечення заданої рівномірності розподілу добрив у ґрунті по ширині захвату робочого органа.

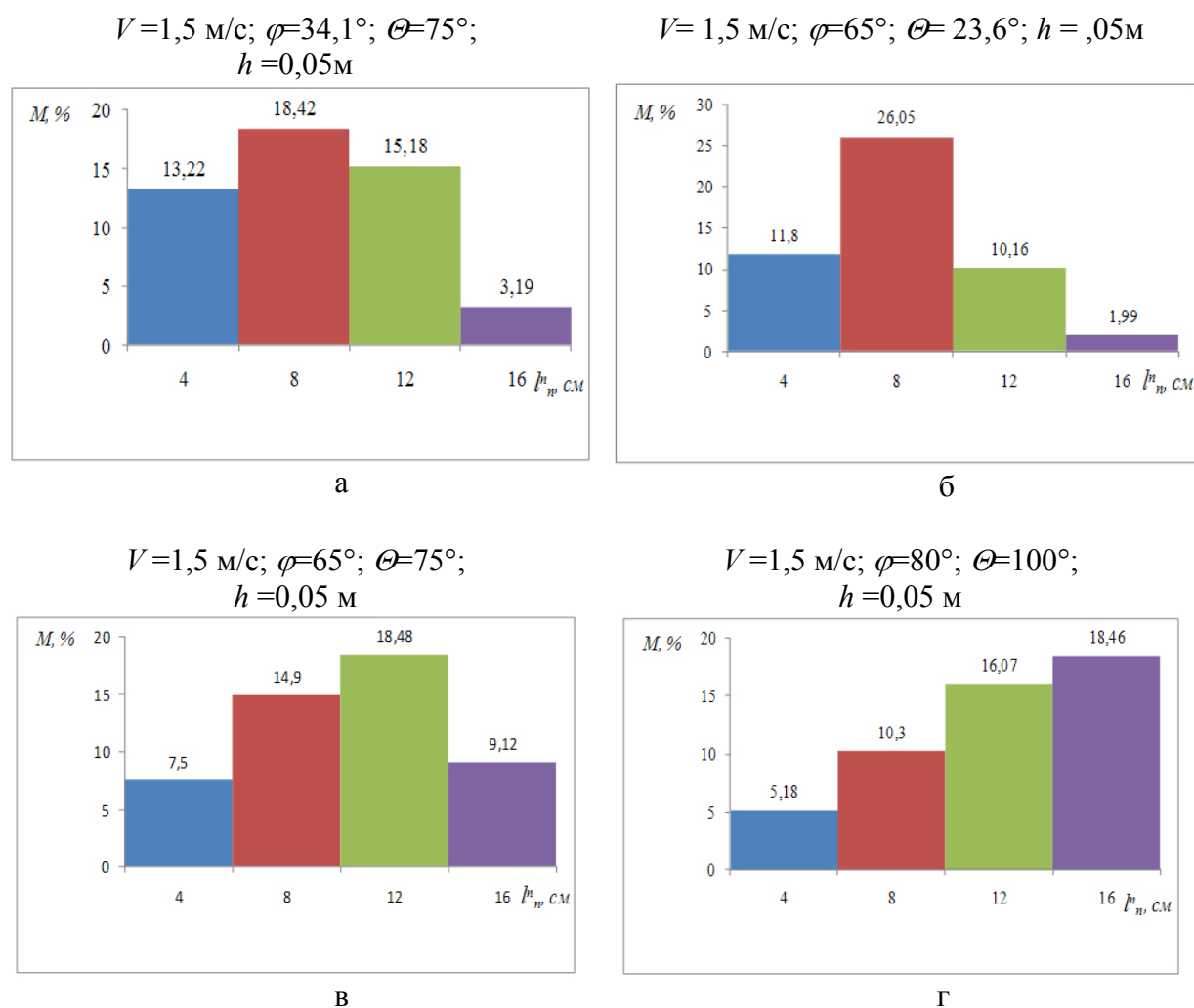


Рисунок 3 –Варіанти розподілу гранул мінеральних добрив по ширині захвату робочого органа відносно його осі при різних значеннях впливових факторів

Джерело: розроблено автором

Вплив окремих факторів на критерій оптимізації має одну характерну особливість – наявність екстремуму [1, 6]. Дальність поперечного польоту гранул l_n зростає до максимальних значень при швидкості на виході з туконапрямника 1,0...1,2 м/с, а потім поступово знижується, в той же час показник концентрації M при даних швидкостях є мінімальним.

Зниження дальності польоту гранул зі збільшенням швидкості V_{nao} пояснюється перерозподілом гранул в результаті зіткнення з внутрішньою поверхнею ґрунтообробного робочого органа [2, 4, 5].

Максимальної дальності поперечного польоту гранул l_n^n можна досягти при куті нахилу ребра призми розподільника відносно горизонту в межах $70...80^\circ$, показник концентрації гранул в певній зоні підлапового простору M також є змінним – мінімальне його значення знаходиться при куті $\varphi = 65...70^\circ$ [1, 4].

Значний вплив на дальність поперечного польоту основної маси гранул l_n^n має кут розхилу граней призми розподільника Θ . Так, показник l_n^n досягає максимуму при куті $\Theta=95...100^\circ$, а потім дещо знижується. При цьому концентрація добрив M також змінюється, і при $\Theta \approx 23^\circ$ показник M є максимальним, при $\Theta=100^\circ$ – мінімальним.

Висота розташування призми розподільника відносно дна борозни також суттєво впливає на дальність поперечного польоту l_n^n гранул та їх концентрацію M . Так, дальність поперечного польоту досягає максимуму при $h = 4,5...5,0$ см, після чого знижується, а концентрація добрив при таких же значеннях h є мінімальною і зростає, досягаючи максимуму при $h = 7,0$ см.

В даному випадку, значення дальності поперечного польоту гранул також пояснюється процесом перерозподілу в результаті контакту з тильною стороною робочого органа. Гранули відбиваються від поверхні і спрямовуються на горизонтальну площину на відстані, меншій ніж вони можуть пролетіти при оптимальній траєкторії, яка проходить між внутрішньою поверхнею робочого органа та площиною його нижнього обрізу чи дном борозни.

Висновки. Аналіз отриманих залежностей дозволяє відмітити, що як для дальності поперечного польоту основної маси гранул в підлаповому просторі встановлюються критерії оптимізації: $Y_1(l_n^n)$ так і для показника концентрації та $Y_2(M)$, раціональні значення кута нахилу ребра призми розподільника відносно горизонтальної площини становить $x_2(\varphi)=75...80^\circ$, при цьому кут між гранями призми (розподільника) $x_3(\Theta)$ становить 100° . Наведені показники попарного впливу підтверджуються отриманими при проведенні експериментів результатами.

Список літератури

1. Дейкун В.А., Сало В.М., Гончаров В.В. Анализ дальности полета частиц минеральных удобрений в подлаповом пространстве. *Motrol. Motorizacja i energetyka rolnictwa*, Lublin, 2012, Tom 14 A. P. 177-179.
2. Дейкун В.А. Визначення початкової швидкості руху часток добрив в місці їх виходу з туконапрямника. *Розвиток наукових досліджень: матеріали восьмої міжн. наук.-практ. конф.* Полтава: «ІнтерГрафіка», 2012. С. 30-33.
3. Дейкун В.А., Сало В.М., Гончарова С.Я. Вплив конструктивних параметрів тукопровода на швидкість потоку гранул добрив. *Електронний збірник*. Київ: Збірник праць НУБІП, 2012. URL: http://archive.nbu.gov.ua/e-journals/Nd/2012_7/12svm.pdf.
4. Дейкун В.А. Визначення факторів та параметрів, що впливають на процес розподілу добрив по ширині захвату робочого органа. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. Мелітополь, 2016. Вип. 4. С. 98-107.
5. Ковбаса В.П., Дейкун В.А. Визначення траєкторії руху частинки за заданого кінематичного режиму. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агро-інженерні дослідження*. Львів: ЛНАУ, 2008. №12(2). С. 539-551.
6. Ковбаса В.П., Дейкун В.А. Визначення умов розсіювання частинок мінеральних добрив у підлаповому просторі. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. Львів: Львів. нац. аграр. ун-т, 2008. №12(2). С. 180-188

7. Малев М.К. Обоснование параметров рабочих органов сеялок-культиваторов для посева на почвах, подверженных ветровой эрозии. Механизация возделывания зерновых культур на почвах, подверженных ветровой эрозии. Алма-Ата: Кайнар, 1971. С. 95-117.
8. Пастухов В.І., Фесенко Ю.В., Сівцов В.С., Шерстюк Г.В. Обґрунтування тукової машини для локального внесення сипучих мінеральних добрив конструкції шнекового робочого органу. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка*. Харків, 2010. Вип. 103. С. 156-169.
9. Робочий орган для локального внесення мінеральних добрив: пат. 3724 Україна: №2004021299; заявл. 23.02.2004; опубл. 15.12.2004, Бюл. №12.
10. Перетятко А.В., Ивженко С.А., Брежнев А.Л. Теоретическое обоснование геометрических параметров направлятеля-распределителя семян лапового сошника. Самара: ФГОУ ВПО Самарская ГСХА, 2005. В кн. Актуальные проблемы сельскохозяйственной науки и образования: сб. науч. работ. С. 96-101.

References

1. Deikun, V.A. (2012). Analiz dal'nosty poleta chastyts myneral'nykh udobrenny v podlapovom prostranstve [An analysis of distance of flight of particles of mineral fertilizers in subpaw space]. *Motrol. Motorizacija i energetyka rolnictwa, Lublin, Vol. 14 A*, 177-179 [in Poland].
2. Deikun, V. A. (2012). Vyznachennia pochatkovoї shvydkosti rukhu chastok dobryv v mistsi yikh vykhodu z tukonapriamnyka [Determination of the initial velocity of the particles of fertilizers in the place of their exit from the tupon]. *Rozvytok naukovykh doslidzhen Materialy vosmoi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. – Poltava: «InterHrafika»* [in Ukrainian].
3. Deikun, V. A. (2012). Vplyv konstruktivnykh parametriv tukoprovoda na shvydkist potoku hranul dobryv [Influence of constructive parameters of the tinplate on the flow rate of granules of fertilizers]. *Elektronnyi zbirnyk, Kyiv: Zbirnyk prats Natsionalnyi universytet bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. – http://archive.nbuv.gov.ua/e-journals/Nd/2012_7/12svm.pdf* [in Ukrainian].
4. Deikun, V. A. (2016). Vyznachennia faktoriv ta parametriv, shcho vplyvaiut na protses rozpodilu dobryv po shyryni zakhvatu robochoho orhana [Determination of factors and parameters influencing the process of distribution of fertilizers on the width of the capture of the working body]. *Visnyk Ukrainського viddilennia Mizhnarodnoi akademii ahrarnoi osvity. 4*, 98-107 [in Ukrainian].
5. Kovbasa, V. P. (2008). Vyznachennia traiektorii rukhu chastynky za zadanoho kinematychnoho rezhymu [Determination of the trajectory of the particle motion for a given kinematic regime]. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu: ahroinzhenerni doslidzhennia*, Lviv: Lvivskiy natsionalnyi ahrarnyi universytet, 12(2), 539-551 [in Ukrainian].
6. Kovbasa, V. P. (2008). Vyznachennia umov rozsuiuvannia chastynok mineralnykh dobryv u pidlapovomu prostori [Determination of the conditions for dispersion of mineral fertilizer particles in the underlying space]. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu: ahroinzhenerni doslidzhennia*, Lviv: Lvivskiy natsionalnyi ahrarnyi universytet, 12(2), 180-188 [in Ukrainian].
7. Malev, M. K. (1971). Obosnovanye parametrov rabochoykh orhanov seialok-kultyvatorov dlia poseva na pochvakh, podverzhennykh vetrovoi erozyi [Justification of parameters of working bodies of cultivator seeders for sowing in soils subject to wind erosion]. *Mekhanizatsiya vozdeleyvaniya zernovykh kultur na pochvakh, podverzhennykh vetrovoi erozyi*, Alma-Ata: Kainar [in Kazakhstan].
8. Pastukhov, V. I. (2010). Obgruntuvannia tukovoi mashyny dlia lokalnoho vnesennia sypuchykh mineralnykh dobryv konstruksii shnekovoho robochoho orhanu [Substantiation of the carcass machine for the local application of loose mineral fertilizers to the design of a screw working organ]. *Visnyk Kharkivskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka, 103*, 156-169 [in Ukrainian].
9. Pat. 3724. Robochyi orhan dlia lokal'noho vnesennia mineralnykh dobryv [Working body for the local application of mineral fertilizers], zaiavnyk i patentotrymach Kirovohradskiy derzhavnyi tekhnichnyi universytet. – №2004021299; zaiavl. 23.02.2004; opubl. 15.12.2004, Biul. №12 [in Ukrainian].
10. Peretiatko, A.V. (2005). Teoretycheskoe obosnovanye heometrycheskykh parametrov napravyteliaraspredelyteli semian lapovoho soshnyka [Theoretical substantiation of geometric parameters of the guide-distributor of seeds of a lap joint]. *Aktualnye problemy selskokhoziaistvennoi nauky y obrazovaniya*. Sbornyk nauchnykh rabot, Samara: FHOУ VPO Samarskaia HSKhA, 96-101 [in Russian].

Viktor Deikun, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Results of the Study of the Work of the New Combined Working Body

According to the results of laboratory investigations of the work of the experimental combined work body. equipped with a tupon and a distributor for simultaneously with the main non-polar treatment of soil intra-ground introduction of granulated mineral fertilizers with uniform placement of them in the area under the slap space, technological and kinematic parameters that significantly affect the quality of the process, the impact of the flight speed of fertilizer granules on the exit from the tupon-strap, the height of the distributor's position above the surface of the lower edge of the paw, the angle of inclination of the edge of the prism and the angle between its faces on the distance the transverse flight of the main mass of fertilizers and the uniformity of their distribution on the design width of the trap.

The design of a combined working body for intragrating granular mineral fertilizers is equipped with a device with well-defined parameters that allows the flow of granules of fertilizers to the point of their contact with the edges of the distributor prisms, after reflection of which they are directed in a given direction.

The proposed working body allows uniform placement of the prescribed dose of mineral fertilizers to the required depth with their simultaneous earnings, which reduces energy costs for the implementation of technological operations.

fertilizers, tuponapryadnik, distributor, optimal parameters, influential factors, optimization criteria, range, fertilizer concentration

Одержано (Received) 22.11.2018

Прорецензовано (Reviewed) 30.11.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

УДК 631.363.7

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.189-197>

В.С. Хмельовський, доц., канд. техн. наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

e-mail: khmelovskyi@nubip.edu.ua

Аналіз руху кормової суміші в бункері кормоприготувального агрегату

У статті описано результати досліджень руху кормової суміші в бункері кормоприготувального агрегату. Теоретичний аналіз дозволив встановити, що за умови, $\omega < 2\Omega$ на вісі OZ вплив точкового джерела збурення тиску p' простягається у цьому випадку по всьому об'єму кормової суміші, причому вплив спадає при віддаленні від джерела збурення за степеневим законом. Дослідження дозволили отримати залежності кута між хвильовим вектором $\vec{k}$ та вектором $\vec{\Omega}$, який повинен знаходитись в межах $12-19^\circ$, що дає можливість забезпечити ефективне змішування кормових компонентів та уникнення застійних зон.

кормоприготувальний агрегат, змішувальний ротор, кормова суміш, хвильовий вектор, ефективне змішування

В.С. Хмелевский, доц., канд. техн. наук

Національний університет біоресурсів і природопольовання України, г. Киев, Украина

Анализ движения кормовой смеси в бункере кормоприготовительного агрегата

В статье описаны результаты исследований движения кормовой смеси в бункере кормоприготовительного агрегата. Теоретический анализ позволил установить, что при условии, $\omega < 2\Omega$ по оси OZ влияние точечного источника возмущения давления p' распространяется в этом случае по всему объему кормовой смеси, причем влияние убывает при удалении от источника возмущения по степенному закону. Исследования позволили получить зависимости угла между волновым вектором $\vec{k}$ и вектором $\vec{\Omega}$, который должен находиться в пределах $12-19^\circ$, что позволяет обеспечить эффективное смешивание кормовых компонентов и избежания застойных зон.

кормоприготовительный агрегат, смесительный ротор, кормовая смесь, волновой вектор, эффективное смешивание

Постановка проблеми. Основою ефективного розвитку галузі тваринництва є повноцінна годівля, яка забезпечується, в першу чергу, наявністю достатньої кількості кормів, зниженням їх втрат, поживності при заготівлі і зберіганні, а також правильною підготовкою до згодовування.

Поряд з тим, головними факторами повноцінної годівлі є: повний набір незамінних поживних речовин, своєчасне і оптимально узгоджене в кількісному відношенні надходження їх в організм тварин. Для достатньо повного задоволення потреб тварин у поживних речовинах їх раціони, згідно даних наукових досліджень, повинні бути збалансованими та приготовленими у вигляді кормової суміші. Змішування кормових компонентів для приготування кормосуміші є одним із основних завершальних технологічних процесів у кормоприготуванні, який полягає у забезпеченні рівномірного розподілу частинок кожного компонента в об'ємі суміші взаємним їх переміщенням під дією зовнішніх сил. Якість технологічного процесу змішування кормових компонентів оцінюють ступенем однорідності кормосуміші, який повинен відповідати зоотехнічним вимогам і перебувати в межах 85...95%.

Практичний досвід свідчить про те, що через порушення режиму годівлі та поїння продуктивність дійних корів знижується приблизно на 15%, а неякісно приготовані корми спричиняють захворювання тварин і зниження приростів на 10–15% [1, 2]. Кормові суміші з різних компонентів готують за допомогою кормоприготувальних агрегатів. Наразі в Україні, як і загалом у світовій практиці для приготування кормів, дедалі більшого поширення набувають кормоприготувальні агрегати, які поєднують операції подрібнення і змішування, транспортування і дозованого роздавання кормів на кормові столи. Ці агрегати вирізняються мобільністю, простотою конструкції, однак, робочі органи таких машин є недостатньо вивченими з позиції енергетичних ресурсів, а створення принципово нових конструкцій вимагає проведення додаткових досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Удосконаленню і різностороннім дослідженням кормоприготувальних машин присвячено праці багатьох вчених [3-8].

Основними задачами, що вирішувалися дослідниками є підвищення показників технологічної ефективності та надійності роботи машин і обладнання, які використовуються в процесі приготування кормових компонентів до згодовування та роздавання кормової суміші в годівниці та на кормові столи тваринам. Дослідженням, пов'язаним з використанням енергетичних ресурсів кормоприготувальними агрегатами та обґрунтуванням параметрів таких машин приділено недостатньо уваги. Це пояснюється тим, що для приготування кормових компонентів використовували спеціальні машини, які подрібнювали окремі види кормових компонентів або машини, які входили до складу кормоцехів, наприклад КОРК-15, та приготування кормових компонентів здійснювали в безперервному режимі і були досліджені раніше [1- 3, 7, 8].

У навчально-науково-виробничій лабораторії Механізації виробничих процесів у тваринництві на базі ВП НУБІП України НДГ "Агрономічна дослідна станція"

Національного університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, було проведено теоретико-експериментальні дослідження процесу приготування кормової суміші на молочнотоварній фермі та виявлено зниження енергетичних показників, а також підвищення однорідності кормової суміші [3-5], однак питання уникнення застійних зон досліджені не в повній мірі.

Постановка завдання. Зважаючи на викладене вище, актуальною задачею є виявлення точкового джерела збурення кормової суміші для забезпечення ефективного змішування кормових компонентів та уникнення застійних зон в бункері кормоприготувального агрегату.

Виклад основного матеріалу. Рух кормової суміші в бункері кормоприготувального агрегату забезпечує шнековий робочий орган. При сходженні кормової суміші із спіралі шнека в надгвинтовому просторі утворюється хвиля. Залежно від геометричних параметрів бункера та шнекового робочого органу утворена хвиля сприяє ефективному змішуванню кормових компонентів та утворенню однорідної суміші.

Введемо циліндричні координати (r, φ, z) з віссю z вздовж вектора $\vec{\Omega}$, (рис. 1.), де Ω – кутова швидкість обертання кормової суміші, с^{-1} .

Своєрідний тип внутрішніх хвиль може розповсюджуватись у кормовій суміші, яка рівномірно обертається. (При цьому вважатимемо кормову суміш такою, що не стискається, тобто її щільність ρ незмінна у часі й просторі). Походження цих хвиль пов'язане із виникаючими при обертанні силами Кориоліса [9-13].

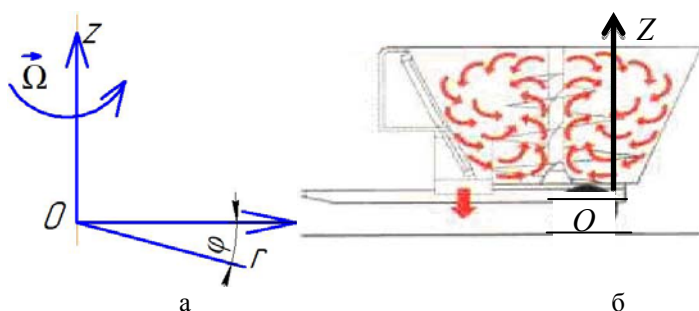


Рисунок 1 – Рух кормової суміші а) в циліндричних координатах;
б) в бункері кормоприготувального агрегату

Джерело: розроблено автором

Розглянемо кормову суміш у системі координат, яка обертається разом із нею. Як відомо, при такому описі у механічні рівняння руху слід додатково ввести сили – відцентрову та Кориоліса.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p, \quad (1)$$

де $\vec{v}$ – швидкість руху кормової суміші, м/с;

p – тиск, Па;

ρ – щільність кормової суміші, кг/м^3 ;

$\vec{\nabla}$ – оператор «набла», $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \vec{j} + \dots \frac{\partial}{\partial z} \cdot \vec{k}$;

$(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ – орти вдовж декартової системи координат, або оператор Гамільтона.

Оскільки, кормова суміш знаходиться у полі тяжіння, то рівняння має вид:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \vec{g}, \quad (2)$$

де $\vec{g}$ – прискорення вільного падіння, м/с².

Відцентрова сила може бути подана у вигляді градієнта $\nabla [\vec{\Omega} \cdot \vec{r}]^2 / 2$,

де $\vec{\Omega}$ – вектор кутової швидкості обертання кормової суміші,
 $\vec{r}$ – радіус бункера, м.

Відповідно відцентрову силу можна об'єднати з силою $\left(\frac{\nabla p}{\rho} \right)$, вводячи ефективний тиск p^* :

$$p^* = p - \frac{\rho}{2} [\vec{\Omega} \cdot \vec{r}]^2. \quad (3)$$

Коріолісова сила дорівнює $2[\vec{v} \cdot \vec{\Omega}]$. Вона проявляє себе лише при русі рідини відносно системи координат, що обертається ($\vec{v}$ – швидкість у цій системі). Причому, як і відцентрова сила, сила Коріоліса записана як сила віднесена до одиничної маси кормової суміші. Отже, остаточно рівняння набуває вигляду:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{v} + 2[\vec{v} \cdot \vec{\Omega}] = -\frac{1}{\rho} \nabla p^* + \vec{g}. \quad (4)$$

Рівняння неперервності для кормової суміші, що не стискається, має вигляд:

$$\text{div} \vec{v} = 0. \quad (5)$$

У подальшому вважаємо амплітуду хвилі малою, тому нехтуємо членом $(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{v}$ у (4) рівнянні. Вважаючи, що p' – змінна частина тиску у хвилі, й нехтуючи гравітаційною складовою ($\vec{g}$), матимемо:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + 2[\vec{v} \cdot \vec{\Omega}] = -\frac{1}{\rho} \nabla p'. \quad (6)$$

Отже, вважаючи, що $\vec{v} = \{V_r, V_\phi, V_z\} \cdot \exp\{i \cdot (kz - \omega t)\}$, з (6), маємо:

де k – хвильовий вектор,

t – час, с;

ω – частота (кругова) розповсюдження хвилі, с⁻¹.

$$\begin{cases} -i \cdot \omega \cdot V_r - 2 \cdot \Omega \cdot V_\phi = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p'}{\partial r}; \\ -i \cdot \omega \cdot V_\phi - 2 \cdot \Omega \cdot V_r = 0; \\ -i \cdot \omega \cdot V_z = -\frac{ik}{\rho} \cdot p'. \end{cases} \quad (7)$$

Рівняння неперервності набуває виду:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot V_r) + ik \cdot V_z = 0. \quad (8)$$

Виражаємо V_ϕ й p' через V_r , з (7) та (8), а потім підставляємо усе у перше рівняння системи (7), тоді маємо:

$$\frac{d^2 F}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dF}{dr} + \left[\frac{4\Omega^2 k^2}{\omega^2} - k^2 - \frac{1}{r^2} \right] \cdot F = 0, \quad (9)$$

де $F = F(r)$ – функція, що визначає радіальну залежність швидкості V_r :

$$V_r = F(r) \cdot \exp\{i \cdot (\omega t - kz)\}. \quad (10)$$

Для розв'язку (9), який перетворюється у нуль при $r = 0$ (умова скінченності розв'язку задачі для будь-якого r), маємо:

$$F = \text{const} \cdot I_1 \left(kr \cdot \sqrt{\frac{4\Omega^2}{\omega^2} - 1} \right), \quad (11)$$

де I_1 – функція Бесселя першого порядку від дійсного аргументу $kr \cdot \sqrt{\frac{4\Omega^2}{\omega^2} - 1}$.

При цьому, умовою дійсності цього аргументу є нерівність:

$$\frac{4\Omega^2}{\omega^2} - 1 > 0 \Rightarrow \frac{4\Omega^2}{\omega^2} > 1 \Rightarrow 4\Omega^2 > \omega^2 \Rightarrow \omega < 2\Omega. \quad (12)$$

Вся картина руху у хвилі розпадається на області, обмежені коаксіальними циліндричними поверхнями з радіусами r_n , які визначаються рівностями:

$$k \cdot r_n \cdot \sqrt{\frac{4\Omega^2}{\omega^2} - 1} = x_n, \quad (13)$$

де $x_1, x_2, \dots$ – послідовні нулі функції $I_1(x)$. На цих поверхнях $V_r = 0$, інакше кажучи, кормова суміш ніколи не перетинає їх (рис. 2.)

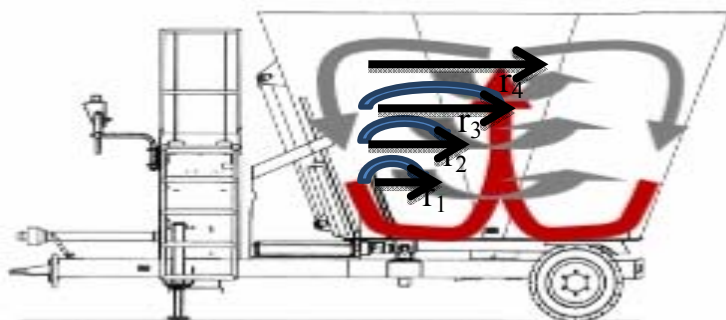


Рисунок 2 – Траєкторії руху хвиль кормової суміші, що обертаються з круговою частотою Ω навколо вісі

Джерело: розроблено автором

Слід зазначити, що для розглядуваних хвиль у необмеженій кормовій суміші частота хвиль ω не залежить від хвильового вектора k (тобто відсутня дисперсія таких хвиль). Можливі значення частоти ω все ж таки обмежені умовою $\omega < 2\Omega$. Інакше, рівняння (9) не має розв'язків, які задовольняють умови скінченності.

Розглянемо рівняння, яке описує довільне мале збурення тиску (p) у кормовій суміші, що обертається.

Будемо виходити з рівняння (6), яке можна розписати у компонентах. Це дає наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_x}{\partial t} - 2 \cdot \Omega \cdot V_y = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p'}{\partial x}; \\ \frac{\partial V_y}{\partial t} + 2 \cdot \Omega \cdot V_x = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p'}{\partial x}; \\ \frac{\partial V_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p'}{\partial z}. \end{cases} \quad (14)$$

Продиференціюємо ці три рівняння відповідно по x , y , z й складемо їх з урахуванням рівняння $\text{div} \vec{V} = 0$ (рівняння неперервності для кормової суміші, що не стискається).

Матимемо:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \Delta p' = 2\Omega \cdot \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \right), \quad (15)$$

де $\Delta = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) = (\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla})$ – оператор Лапласа.

Диференціювання рівняння (15) за часом t , із врахуванням рівнянь (14), дає можливість отримати вираз:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\Delta p') = 4\Omega^2 \cdot \frac{\partial V_z}{\partial z} \quad (16)$$

наступне диференціювання за часом t приводить до кінцевого рівняння:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} (\Delta p') + 4\Omega^2 \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0. \quad (17)$$

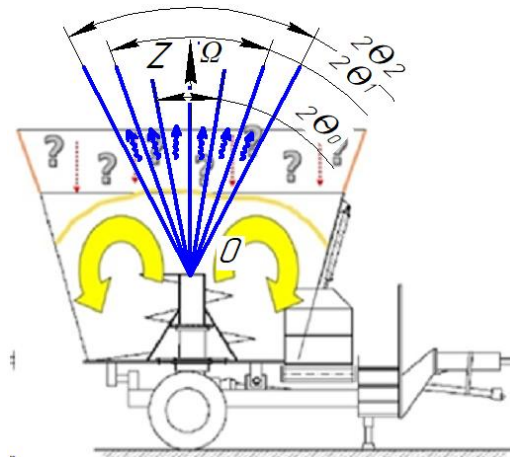
Для періодичних збурень з частотою ω рівняння (17) зводиться до наступного:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p'}{\partial y^2} + \left(1 - \frac{4\Omega^2}{\omega^2} \right) \frac{\partial^2 p'}{\partial z^2} = 0 \quad (18)$$

Для хвиль виду: $\vec{V} = \vec{A} \cdot \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r}) - \omega t]$, $i^2 = -1$, з (18) можна отримати дисперсійне співвідношення:

$$\omega = 2\Omega \cdot \frac{kz}{k} = 2\Omega \cdot \cos \theta, \quad (19)$$

де $\theta = (\vec{k}, \vec{n})$ – кут між хвильовим вектором $\vec{k}$ та вектором $\vec{\Omega}$. При цьому, $\omega < 2\Omega$ й коефіцієнт при $\frac{\partial^2 p'}{\partial z^2}$ у рівнянні (18) від'ємний. Збурення від точкового джерела розповсюджуються вздовж твірних конуса з віссю вздовж Ω й кутом розхилу 2θ , де $\sin \theta = \frac{\omega}{2\Omega}$ (рис. 3).

Рисунок 3 - Траєкторії руху хвиль від точкового джерела збурення p'

Джерело: розроблено автором

Висновки. На основі проведення досліджень вдалося встановити наступне:

1. За умови, що $\omega < 2\Omega$ на вісі OZ вплив точкового джерела збурення (тиску p') простягається у цьому випадку по всьому об'єму кормової суміші, причому вплив спадає при віддаленні від джерела збурення за степеневим законом.
2. Для забезпечення ефективного змішування кормових компонентів та уникнення застійних зон, кут 2θ повинен знаходитись в межах $12-19^\circ$.

Список літератури

1. Машини та обладнання для тваринництва / Ревенко І.І. та ін. Київ: ТОВ «ЦП Компрінт», 2018. 567 с.
2. Машини і обладнання для тваринництва / Ревенко І.І. та ін. Ніжин: ПП Лисенко М.М., 2017. 304 с.
3. Vasyl Khmelovskyi, Study of process of cooking a high-energy feed mixtures for cattle. TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. Lublin–Rzeszów, 2018. Vol. 18. No 1. P. 39-43.
4. Новицький А.В., Новицький Ю.А. Класифікація робочих органів типу «ніж» засобів для приготування і роздавання кормів. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. Київ, 2017. Вип. 262 (2017). С. 287-296.
5. Новицький А.В., Новицький Ю.А. Технічна оцінка споживчих якостей сільськогосподарської техніки. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. Київ, 2017. Вип. 264 (2017). С. 293-303.
6. Новицький А.В. Дослідження динаміки зміни показників надійності засобів для приготування і роздачі кормів. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. Київ, 2016. Вип. 241, ч. 1. С. 334-338.
7. Хмельовський В. С. Перспективні технологічні рішення підготовки кормів для згодовування рогатій худобі. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. Київ, 2013. Вип. 185, ч. 2. С. 390-394.
8. Хмельовський В. С., Ачкевич О. М. Дослідження процесу приготування високоенергетичної кормової суміші для ВРХ. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. Київ, 2017. Вип. 262. С. 304-314.
9. Численное исследование структуры течения и теплообмена при закрученном течении битумно-дисперсных систем в цилиндрических каналах / Базуев В. П. и др. *Вестник Томского гос. архит. – строит. ун-та*, 2014. № 2. С. 80-93.
10. Матвиенко О. В., Базуев В. П., Южанова Н. К. Математическое моделирование течения закрученного потока псевдопластической жидкости в цилиндрическом канале. *Инженерно-физический журнал*, 2014. Т. 87, № 1. С. 192-199.

11. Ногин Н.В. Периодическое движение вязкой несжимаемой жидкости по неограниченной цилиндрической трубе. *Вісник ХТУ «ХПІ»*. Харків, 2013. № 16 (989). С. 182-186.
12. Матвиенко О. В., Базуев В. П., Туркасова Н. Г., Байгулова А. И. Исследование процесса модификации битума в инжекторном смесителе. *Вестник Томского гос. архит. – строит.ун-та*, 2013. № 3. С. 202–213.
13. Матвиенко О. В., Базуев В. П., Дульзон Н. К. Математическое моделирование течения закрученного потока дилатантной жидкости в цилиндрическом канале. *Инженерно-физический журнал*, 2014.Т. 87, № 1. С. 192-199.

References

1. Revenko, I.I. et al. (2018). Mashyny ta obladnannya dlya tvarynnycztva. [Machines and equipment for livestock breeding]. Kyiv: TOV «CzP Kompry`nt» [in Ukrainian].
2. Revenko, I.I. et al. (2017). Mashyny ta obladnannya dlya tvarynnycztva. [Machines and equipment for livestock breeding]. Nizhyn: PP Lysenko M.M. [in Ukrainian].
3. Khmelovskiy, V. (2018). Study of process of cooking a high-energy feed mixtures for cattle. TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. Lublin–Rzeszów, Vol. 18, 1, 39-43. [in Poland].
4. Novitskiy, A.V., Novytskiy, Y.A. (2017). Klasyfikaciya robochyx organiv typu «nizh» zasobiv dlya prygotuvannya i rozdavannya kormiv [Classification of working tools of the "knife type" for the preparation and distribution of feed]. *Naukovyy visnyk Nacionalnogo universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrayiny. Seriya: Teknika ta energetyka APK. - Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Series: Engineering and Power Engineering of Agroindustrial Complex*, Vol. 262, 287-296. [in Ukrainian].
5. Novitskiy, A.V., Novytskiy, Y.A. (2017). Texnichna ocinka spozhyvchyx yakostej silskogospodarskoyi texniki [Technical evaluation of consumer qualities of agricultural machinery]. *Naukovyy visnyk Nacionalnogo universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrayiny. Seriya: Teknika ta energetyka APK. - Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Series: Engineering and Power Engineering of Agroindustrial Complex*, Vol. 264, 293-303. [in Ukrainian].
6. Novitskiy, A.V. (2016) Doslidzhennya dynamiky zminy pokaznykiv nadijnosti zasobiv dlya prygotuvannya i rozdachi kormiv [Investigation of the dynamics of changes in the reliability indicators of means for the preparation and distribution of feeds]. *Naukovyy visnyk Nacionalnogo universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrayiny. Seriya: tekhnika ta energetyka APK. - Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: engineering and power engineering of agroindustrial complex*, Vol. 241, part 1, 334-338. [in Ukrainian].
7. Khmelovskiy, V.S. (2013). Perspektyvni texnologichni rishennya pidgotovky kormiv dlya zgodovuvannya rohatij xudobi [Promising technological solutions for the preparation of feed for feeding cattle]. *Naukovyy visnyk Nacionalnogo universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrayiny. Seriya: tekhnika ta energetyka APK. - Scientific herald of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Series: engineering and power engineering of agroindustrial complex*, Vol. 185, part 2, 390-394. [in Ukrainian].
8. Khmelovskiy, V.S., Achkevich, O.M. (2017). Doslidzhennya procesu prygotuvannya vysokoenergetychnoyi kormovoyi sumishi dlya VRX. [Investigation of the process of preparation of a high-energy feed mixture for cattle]. *Naukovyy visnyk Nacionalnogo universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrayiny. Seriya: tekhnika ta energetyka APK. - Scientific herald of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Series: engineering and power engineering of agroindustrial complex*, Vol. 262, 304-314. [in Ukrainian].
9. Bazuyev, V.P., Matvienko, O.V., Dulzon, N.K., Smirnova, N.G., Agafonova, M.V. (2014). Chyslennoe issledovanye struktury techeniya y teploobmena pryzakruchenom techenyy bytumno-dyspersnykh system v cylyndrycheskyyx kanalex [A numerical study of the structure of flow and heat exchange under the twisted flow of bitumen-disperse systems in cylindrical channels]. *Vestnyk Tomskogo gos. arxyt. – stroyt. un-ta. – Vestnik Tomsk state archit - builds Un-that*, 2, 80 - 93. [in Russian]
10. Matvienko, O.V., Bazuev, V.P., Yuzhanova, N.K. (2014). Matematycheskoe modelirovanye techeniya zakruchenogo potoka psevdoplastycheskoj zhydkosti v cylyndrycheskom kanale [Mathematical modeling of the flow of a twisted flow of a pseudoplasty liquid in a cylindrical channe]. *Ynzhenerno-fyzycheskyy zhurnal. – Engineering-Physical Journal*, Vol. 87, 1, 192 - 199. [in Russian]

11. Nogin, N.V. (2013.) Peryodicheskoe dvizhenie vyazkoj neszhymaemoj zhydkosti po neogranychennoj cylyndrycheskoj trube [Periodic motion of a viscous incompressible fluid in an unlimited cylindrical tube]. *Visnyk NTU «XPI»*. – *Bulletin of the NTU "KhPI"*, 16, 182-186. [in Ukrainian].
12. Matvienko, O.V, Bazuev, V.P, Turkasova, N.G., Baigulova, A.I. (2013). Yssledovanye processa modyfikacyy bytuma v ynzhektornom smesytele [Research of the process of modification of bitumen in an injector mixer]. *Vestnyk Tomskogo gos. arxyt. – stroyt. un-ta. – Vestnik Tomskogo gos. archit - builds Un-that*. 3, 202 - 213. [in Russian]
13. Matvienko, O.V., Bazuev, V.P., Dulzon, N.K. (2014). Matematycheskoe modelyrovanye techenyya zakruchenogo potoka dylatantnoj zhydkosti v cylyndrycheskom kanale [Mathematical modeling of the flow of a twisted flow of a dilatant fluid in a cylindrical channel] *Ynzhenerno-fyzycheskyj zhurnal. – Engineering-Physical Journal*. Vol. 87, 1, 192 - 199. [in Russian]

Vasyl Khmelovskiy, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Analysis of the Feed Mix in the Hopper of the Feed Preparation Unit

The purpose of the article is to detect the position of the OZ axis of a point source of permeation of the feed mixture, which affects the effectiveness of the mixing of feed components and ensures the avoidance of stagnant zones in the hopper of the feed preparation unit.

The movement of the feed mixture in the hopper of the feed preparation unit provides a screw working organ in cylindrical coordinates (r, φ, z) with an axis z along the vector Ω of the angular velocity of the feed mixture. When the fodder mixture comes from a spiral of a screw in a super-spiral space, a wave forms.

Depending on the geometric parameters of the bunker and the screw working organ, the wave formed promotes the effective mixing of feed components and the formation of a homogeneous mixture.

The article describes the results of research on the movement of the feed mixture in the hopper of the feed preparation unit. The theoretical analysis has made it possible to establish that, provided $\omega < 2\Omega$ on the axis of OZ, the influence of the point source of perturbation of pressure p' extends in this case throughout the volume of the feed mixture, and the effect decreases in the distance from the source of perturbation by the power law.

The studies allowed to obtain angular dependences between the wave vector $\vec{k}$ and the vector $\vec{\Omega}$, which makes it possible to ensure consistent mixing of feed components inside the bunker

A peculiar type of internal waves propagates in a feed mixture that is evenly rotated. (In this case we consider the feed mixture to be non-compressible, ie, its density ρ is constant in time and space). The origin of these waves is due to the emergence of Coriolis forces and constant feeding of the feed mixture with a screw.

On the basis of the research it was succeeded to establish the following.

Assuming that $\omega < 2\Omega$ on the OZ axis, the influence of the point source of perturbation (pressure p') extends in this case throughout the volume of the feed mixture, with the effect decreasing in the distance from the source of perturbation by the power law.

To ensure effective mixing of feed components and avoidance of stagnant zones, the angle 2θ should be within the range of 12-19°.

feed preparation unit, mixing rotor, feed mixture, wave vector, efficient mixing

Одержано (Received) 4.12.2018

Прорецензовано (Reviewed) 14.12.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018

Зміст

И.И. Беилягэ, Л.Г. Малай

Анализ термодинамических процессов двигателей внутреннего сгорания работающих на биодизеле 3

С.М. Лещенко, В.М. Сало, Д.І. Петренко, О.М. Васильковський

Вплив конструктивно-технологічних параметрів робочих органів глибокорозпушувача на тяговий опір 12

К.В. Васильковська

Системний аналіз конструкцій пневмомеханічних висівних апаратів для точного висіву насіння просапних культур 22

О.П. Лобок, Б.М. Гончаренко, Л.Г. Віхрова, М.А. Сич

Задача вибору оптимальної стратегії мінімаксного керування в сільськогосподарському виробництві об'єктами з розподіленими параметрами 35

А.В. Рудковський, С.І. Маркович, С.С. Михайлюта

Методика планування експерименту та побудови математичної моделі процесу зміцнення поршнів автотракторних двигунів вакуумним азотуванням у пульсуючому пучку плазми 45

Ю.О. Ковальчук, І.О. Лісовий

Дослідження структури та мікротвердості обробленої лазером поверхні чавунів 54

Ю.В. Кулешков, Т.В. Руденко, М.В. Красота

Енергозберігаючий гідропривід механізму піднімання кузова автомобіля-самоскида 62

А.П. Лобок, Б.Н. Гончаренко, Л.Г. Віхрова, М.А. Сич

Синтез модального керування багатовимірними лінійними системами в сільськогосподарському виробництві на основі лінійних матричних нерівностей 69

Ю.М. Пархоменко, М.Д. Пархоменко, А.Р. Бокій

Аналіз можливостей датчиків об'ємної дії, що застосовуються в діючих системах контролю висіву 79

Р.М. Минайленко, О.М. Дреєв, О.Г. Собінов, О.О. Денисенко

Апаратно-програмний комплекс вимірювання вологості зерна в потоці з інтерфейсом за протоколом Modbus та Owen 88

С.І. Маркович, Х.Р. Задорожна, Г.Г. Веселівська, В.М. Гвоздецький, Я.Я. Сірак, Я.С. Корінь

Структура, зносотривкість та корозійна тривкість покриттів $vc-fest$ та $vc-festco$, отриманих надзвуковим газополуменевим напиленням hvo_f	102
<i>В.Л. Куликівський, В.М. Боровський, В.К. Палійчук</i>	
Транспортування зерна сої гвинтовими робочими органами під час збирання та післязбиральної обробки	110
<i>Ю.В. Кулешков, Т.В. Руденко, М.В. Красота, Р.А. Осін</i>	
Зниження масогабаритних показників шестеренного насоса оптимізацією параметрів зубчатого зачеплення	118
<i>О.Ф. Сіса, В.В. Пукалов, В.В. Юр'єв</i>	
Розмірна обробка електричною дугою бічної поверхні зносостійкого інструменту	127
<i>М.Л. Засць</i>	
Визначення швидкості руху насіння по розподільнику сошника для підґрунтового-розкидного способу сівби	135
<i>І.О. Скринник, І.О. Пісарькова, М.М. Петренко</i>	
Механічне травмування насіння	143
<i>Л.В. Коломієць, С.А. Мартиненко, К.А. Левицька</i>	
Оцінка шляхів використання відходів рослинницької продукції.....	154
<i>І.А. Велит, Д.О. Бондаренко</i>	
Агрегат для плющення зерна в потоково-технологічних лініях кормоприготувального відділення молочної ферми.....	164
<i>Е. Б. Алієв</i>	
Критерії оцінки якості процесу сепарації насінневої суміші.....	170
<i>О.М. Васильковський, С.М. Леценко, С.М. Мороз, Д.І. Петренко</i>	
Дослідження енергоємності холостого ходу відцентрового сепаратора зерна	176
<i>В.А. Дейкун</i>	
Результати дослідження процесу роботи нового комбінованого робочого органа	183
<i>В.С. Хмельовський</i>	
Аналіз руху кормової суміші в бункері кормоприготувального агрегату.....	189

Content

Igor Bershliage, Leonid Malai

Analysis of the Thermodynamic Processes of Internal Combustion
Engines Operating on Biodiesel 3

Sergiy Leshchenko, Vasyl Salo, Dmytro Petrenko, Oleksii Vasylovskyi

Influence of Structural and Technological Parameters of the Operating
Elements of a Deep Tiller on Ploughing Resistance 12

Kateryna Vasylovskva

System Analysis of Constructions of Pneumomechanical Seeding Machines
for Precise Seeding of Seed Crops 22

Oleksiy Lobok, Boris Goncharenko, Larisa Vihrova, Marina Sych

The Problem of Selection of the Optimal Strategy of Minimax Control by
Objects in Agricultural Production with Distributed Parameters..... 35

Anatoly Rudkovsky, Sergiy Markovych, Sergiy Myhajlyta

Method of Planning of Experiment and Construction of Mathematical Model of Process of
Strengthening of Pistons of Auto of Tractor Engines a Vacuum Nitriding in the Pulsating
Bunch of Plasma..... 45

Yuriy Kovalchuk, Ivan Lisoviy

Investigation of the Structure and Microhardness of the Laser-treated Surface
of the Cast Irons 54

Yuriy Kuleshkov, Timofey Rudenko, Mikhail Krasota

Energy-efficient Hydraulic Actuator of the Dumper Carcass Lift Mechanism 62

Oleksij Lobok, Boris Goncharenko, Larisa Vihrova, Marina Sych

Synthesis of Modal Control of Multidimensional Linear Systems in Agricultural
Production Based on Linear Matrix Inequalities..... 69

Yuri Parhomenko, Mikhail Parhomenko, A. Boki

Analysis of the Capabilities of Volumetric Sensors that are Used in Existing
Seeding Monitoring Systems 79

Roman Minailenko, Alexandr Dreev, Alexandr Sobinov, Alexey Denysenko

Development of a Hardware-software System for Measuring the Humidity of Grain
in a Stream With an Interface Using the Modbus and Owen Protocol 88

Sergey Markovych, Khrystyna Zadorozhna, Halyna Veselivska,

Volodumir Hvozdetzkyi, Yaruna Sirak, Yaroslav Koryn'

Structure, Wearproofness That Inoxidizability coverage of VC -FeCr and VC-FeCrCo,
Got Supersonic Gas-flame Spray Method Hvofof 102

Vladimir Kulykivskyi, Victor Borovskyi, Vladimir Paliychuk

Transportation of Soybean Grain Screw Working Bodies During Harvesting and Post-harvest Processing.....	110
<i>Yuriy Kuleshkov, Timofey Rudenko, Mikhail Krasota, Ruslan Osin</i>	
Decreasing of Mass and Dimensions Gear Pump Parameters by Optimizing Gear-tooth System Parameters	118
<i>Oleh Sisa, Viktor Pukalov, Vasiliy Yuryev</i>	
Dimensional Sizing of Lateral Surface of Wearproof Tool by Electrical Arc.....	127
<i>Maxim Zaets</i>	
Parameters Optimization of Combined Valve for Seeds Coulter Sowing Subsoil, Variation Grain Crops	135
<i>Ivan Skrynnik, Iryna Pisarkova, Mykola Petrenko</i>	
Mechanical Grain Damage	143
<i>Lyudmila Kolomiyets, Serhey Martinenko, Levitska Karina</i>	
Estimation of Ways to Use Crop Production Waste	154
<i>Iryna Velit, Denys Bondarenko</i>	
Aggregate for Rolling of Grain in Technological Lines of Feed Unit in the Dairy Farm	164
<i>Elchin Aliiev</i>	
Criteria for Assessing the Quality of the Separation Process of Seed Mixture.....	170
<i>Oleksii Vasylykovskiy, Sergiy Leshchenko, Sergiy Moroz, Dmytro Petrenko</i>	
Investigation of the Energy Intensity of the Idle Speed of the Centrifugal Grain Separator	176
<i>Viktor Deikun</i>	
Results of the Study of the Work of the New Combined Working Body	183
<i>Vasyl Khmelovskiy</i>	
Analysis of the Feed Mix in the Hopper of the Feed Preparation Unit.....	189

**Конструювання, виробництво та експлуатація
сільськогосподарських машин**

Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник

Заснований у 1971 році

Випуск 48

За загальною редакцією М.І. Черновола

Відповідальний за випуск С.М. Лещенко

Комп'ютерна верстка І.М. Каліч

Тиражування О. Г. Каліч

*Приватне підприємство «Ексклюзив-Систем»
Свідоцтво про реєстрацію № 05720-ПП-1 від 10.12.1996.
25006, м. Кіровоград, вул. Шевченка, 25
тел./факс 24-35-53*

Здано в набір 19.12.2018 Підписано до друку 20.12.2018. Формат 60x84 1/8.
Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman Умов. друк. арк. 25,25
Обл. вид. арк. 37,7. Наклад 300 прим. Замовлення №_0291.