

## Конструкція і теорія сільськогосподарських машин Construction and theory of agricultural machines



УДК 631.31

### Исследование рабочих органов дискового лущильника

В.Ф. Пащенко<sup>1</sup>, С.А. Харченко<sup>1</sup>, К.В. Седых<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
 им. П.Василенка (г. Харьков, Украина), *tashinovikoristannia@ukr.net*

<sup>2</sup>Харьковский национальный аграрный университет им. В.В. Докучаева  
 (г. Харьков, Украина), *office@knau.kharkov.ua*

Рассмотрено взаимосвязь геометрических параметров дисков лущильника с их скоростью вращения и параметрами ориентации в пространстве. Определены размеры и форма почвенного пласта, отделяемого диском лущильника. Приведен расчет силовых реакций почвы на сферическую поверхность диска. При решении задач устойчивости движения лущильника учтены диссипативные потери энергии, а также применены методы Ляпунова и разложение системы уравнений в ряд Тейлора. Теоретические исследования проверены экспериментально. В процессе полевых экспериментов изучено влияние параметров лущильника на параметры качества обработки почвы, урожайность возделываемой культуры и технико-экономические показатели.

**Ключевые слова:** почва, взаимодействие, рыхление, отклонение, устойчивость движения, поверхность, диск, лущильник.

**Введение.** Для обоснования технологических параметров механических систем в земледельческой механике используются теоретические и экспериментальные методы. Первые позволяют быстрее и с меньшими материальными затратами решить задачи механики, глубже осмыслить соответствующие проблемы.

При теоретическом описании функционирования механических систем с помощью математических соотношений используются не технические объекты, а их модели.

**Основная часть работы.** Наиболее важным в распределении всех действующих сил в процессе обработки почвенной поверхности, является угол  $\nu_e$  между вектором абсолютной скорости точки лезвия вращающегося диска и нормалью к его сферической поверхности. В соответствии с правилами сферической геометрии  $\nu_e$  определяется через следующие величины:  $\lambda$  — кинетическая константа, связанная со скоростью движения агрегата и способностью вращения диска;  $\alpha$  — угол разворота диска относительно направления его движения по оси  $x$  (угол атаки), град;  $\beta$  — угол наклона диска относительно оси  $z$  (нормали обрабатываемой поверхности), град;  $\varphi$  — сферический угол, характеризующий кривизну рабочей поверхности

диска и его размеры, рад;  $\omega t$  — радиальный угол (рад.) смещения точки лезвия диска в момент времени  $t$  (с), при угловой скорости вращения диска  $\omega$  (с<sup>-1</sup>) [1].

Исходя из теоретических обоснований взаимодействия диска лущильника с почвой на основании теории Канарева Ф.М. [2] на рис. 1 представлен график изменения  $\nu_e$  в зависимости от  $\omega t$  и кинематической константы  $\lambda$  при фиксированных значениях углов  $\alpha$  и  $\beta$ .

Поскольку значение угла  $\nu_e$  является основополагающим показателем для определения сил, действующих на диск лущильника, то далее были проведены расчеты этого показателя для диска с геометрическими размерами, соответствующими размерам диска лущильника ДЛ-5. Графики расчетов  $\nu_e$  для параметров  $\omega t$ ,  $\lambda$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  приведены на рис. 1 - 3.

При анализе графической информации с учетом условий работы лущильника в диапазоне угла смещения точки лезвия диска —  $\omega t$  от 40 до 80 рад. влияние кинематической постоянной  $\lambda$  — незначительно, а углы  $\alpha$  и  $\beta$  существенно сказываются на значениях  $\nu_e$ . На основании таких допущений были проведены расче-

ты векторных значений сил, действующих на диск луцильника.

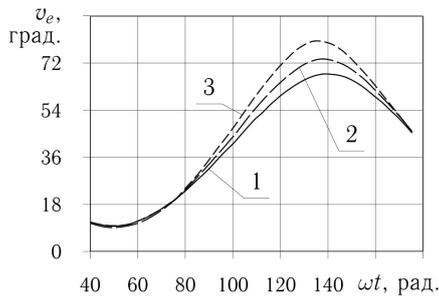


Рис. 1. Закономерности изменения угла  $\nu_e$  в зависимости от величины угла  $\omega t$  для трех значений кинематической константы  $\lambda$  (0, 0,25 и 0,5 — кривые 1, 2 и 3) при фиксированных значениях углов  $\alpha = 25^\circ$  и  $\beta = 20^\circ$

Перед проведением расчетов силовых реакций почвы на сферическую поверхность диска произведено определение геометрических параметров почвенного пласта отделяемого диском луцильника. Геометрические параметры почвенного пласта включают в себя такие величины:  $b$  — расстояние между смежными дисками;  $h$  — высоту продольного гребня, которая зависит от радиуса диска  $R$  и косинуса угла  $\beta$  наклона диска к нормали обрабатываемой поверхности; величину  $A_2 = 0,5b / \sin \alpha$ , где  $\alpha$  — угол разворота диска относительно направления его движения по оси  $x$  (угол атаки).

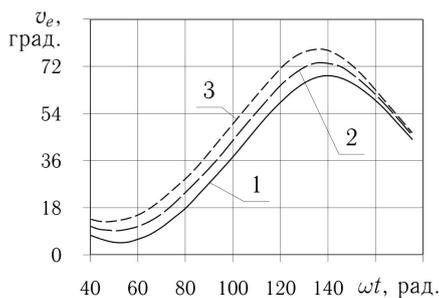


Рис. 2. Закономерности изменения угла  $\nu_e$  в зависимости от величины угла  $\omega t$  для трех значений угла наклона диска  $\beta$  ( $10^\circ$ ,  $20^\circ$  и  $30^\circ$  — кривые 1, 2 и 3) при фиксированных величинах угла  $\alpha = 25^\circ$  и кинематической постоянной  $\lambda = 0,25$

Силу тяжести пласта почвы  $G_{пл}$ , действующей на диск, определяем путем интегрирования по методике Канарева. Результирующую сово-

купности сил, действующих на диск, рассчитываем в виде векторной суммы проекций, используя направляющие косинусы векторов, как это изложено в работе Канарева.

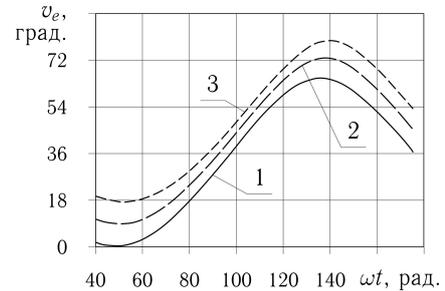


Рис. 3. Закономерности изменения угла  $\nu_e$  в зависимости от величины угла  $\omega t$  для трех значений угла атаки  $\alpha$  ( $15^\circ$ ,  $20^\circ$  и  $35^\circ$  — кривые 1, 2 и 3) при фиксированных значениях угла  $\beta = 20^\circ$  и кинематической постоянной  $\lambda = 0,25$

При сравнении процессов рабочего взаимодействия отдельно взятых дисков с почвенным слоем элементарных участков поля достаточно малой площади наибольшие отклонения проявляются в заглаблении дисков, связанные с микрорельефом поверхности, и различиями в плотности сложения поверхностного слоя на этих участках. Эти процессы относятся к категории случайных, которые при определенных допущениях можно считать основным источником возмущающих сил при работе луцильника. Оценить влияние таких возмущений возможно только при детальной проработке и выборе динамической модели конструкции экспериментального луцильника (рис. 4) на основе положений аналитической механики.

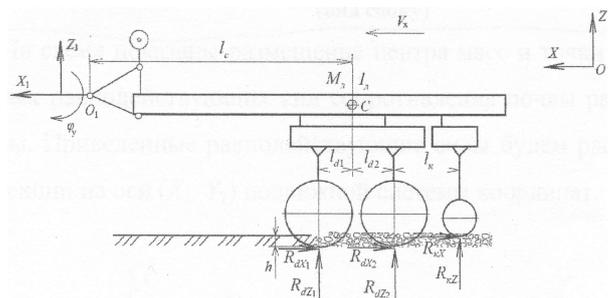


Рис. 4. Конструкция луцильника ДЛ-5 с наличием прикатывающих катков

Технический уровень отечественной техники в недостаточной мере отвечает современным требованиям агротехники, которые обеспечивают внедрение технологий производства конкурентной сельхозтехники [3].

Использование машин и орудий западного производства не всегда является рациональным с точки зрения экономических условий Украины и не всегда соответствует её интересам.

На схеме (рис. 5) показаны размещение центра масс и точки приложения приведенных равнодействующих сил сопротивления почвы рабочими органами машины. Приведенные равнодействующие силы будем рассматривать через их проекции на оси  $(X_1, Y_1)$  подвижной системы координат.

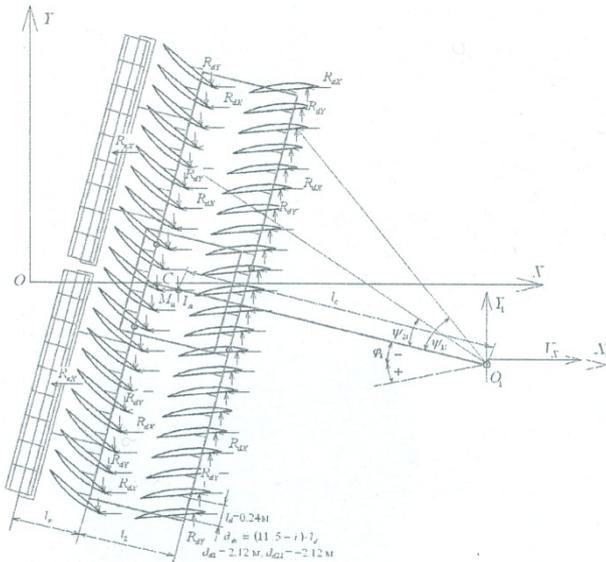


Рис. 5. Эквивалентная расчетная схема экспериментального дискового лущильника ДЛ-5

При использовании методов аналитической механики для нашего случая изначально выбираем независимые параметры, которые определяют положение рассматриваемой механической системы в пространстве. Такие параметры называют обобщенными координатами этой механической системы, а их количество определяет её число степеней свободы.

Используем допущение, что закрепленный к трактору прицепной лущильник совершает прямолинейное, равномерное, горизонтальное движение, т.е.  $V_x = \text{const}$ ,  $V_y = 0$ , а вертикальная составляющая в точке закрепления  $V_z = 0$ . При таких допущениях в нашем случае система имеет только одну степень свободы — угол смещения установки вокруг вертикальной оси  $z$  —  $\varphi_z$  по продольной оси крепления к опорной раме дискового лущильника ДЛ-5. В дальнейшем по тексту угол поворота продольной оси лущильника вокруг точки его крепления к трактору обозначаем  $\varphi_1 = \varphi_z$ .

При исследовании конструкции лущильника на устойчивость его движения с учетом диссипативной энергии в результате подстановок и преобразований дифференциального уравнения по обобщенным координатам и их скоростям получено следующее уравнение:

$$M_{c_1} (D_1 \ddot{\varphi}_1) + I_{c_1} \ddot{\varphi}_1 = Q_\varphi \quad (1)$$

где:

$$D_1 = l^2;$$

$$Q_\varphi = R_{dy} \left( \sum_{i=1}^{22} l_{d1i} \cos(\psi_{1i} + \varphi_1) + \sum_{i=1}^{22} l_{d2i} \cos(\psi_{2i} + \varphi_1) \right) + R_{dx} \left( \sum_{i=1}^{22} l_{d1i} \sin(\psi_{1i} + \varphi_1) + \sum_{i=1}^{22} l_{d2i} \sin(\psi_{2i} + \varphi_1) \right) + 2R_{dy} l_{d1i} \sin(\varphi_1) - K_{\text{дис}} \dot{\varphi}_1 \cdot l - 2k\varphi_1; \quad (2)$$

$K_{\text{дис}}$  — коэффициент диссипации, определяющий интенсивность действия сил трения дисков лущильника о почву.

Преобразовав дифференциальное уравнение (1) с выделением  $\ddot{\varphi}_1$  получаем:

$$\ddot{\varphi}_1 = \frac{Q_\varphi}{M_{c_1} l^2 + I_{c_1}}. \quad (3)$$

Исследуя выражение  $Q_\varphi$  описывающее общий баланс сил и моментов, действующих на рабочие органы лущильника, и принимая допущение ввиду малости угла  $\varphi_1$ , что  $\sin \varphi_1 \approx \varphi_1$ , вполне допустимо предположить, что:

$$\ddot{\varphi}_1 = \frac{Q_\varphi(\varphi, \varphi^2, \dot{\varphi}, t)}{M_{c_1} l^2 + I_{c_1}}. \quad (4)$$

Для решения задачи на устойчивость используем второй метод Ляпунова, с помощью которого производится построение и исследование функций возмущенного движения [2].

Понижаем порядок дифференциального уравнения (1) введением обозначений:  $\dot{\varphi}_1 = \omega$ ;  $\ddot{\varphi}_1 = \dot{\omega}$  для возможного аналитического решения дифференциальных уравнений, описывающих невозмущенное и возмущенное движение механической системы, в нашем случае — конструкцию дискового лущильника.

При этом для невозмущенного движения получаемая система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1 = \omega, \\ \dot{\omega} = \ddot{\varphi}_1(\varphi_1, \omega, Q_\varphi, t). \end{cases} \quad (5)$$

Уравнение возмущенного движения представится  $\dot{\varphi}_1 + \dot{\delta}_1 = \omega + \beta$  и система дифференциальных уравнений представится как:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1 + \dot{\delta}_1 = \omega + \beta \\ \dot{\omega} + \dot{\beta} = \ddot{\varphi}_1(\varphi_1 + \delta_1, \omega + \beta, Q_\varphi, t) \end{cases} \quad (6)$$

где  $\delta_1$  — прирост угла отклонения по ходу движения лущильника относительно продольной оси  $x$ , рад;  $\omega$  — прирост угловой скорости этого отклонения рад/с.

Раскладывая систему уравнений (6) в ряд Тейлора с точностью до первого порядка получаем выражение:

$$\begin{aligned} \dot{\omega} + \dot{\beta} = \ddot{\varphi}_1(\varphi_1, \omega, Q_\varphi, t) + \\ + (\ddot{\varphi}_1(\varphi_1, \omega, Q_\varphi, t))'_{\varphi_1} \delta_1 + (\ddot{\varphi}_1(\varphi_1, \omega, Q_\varphi, t))'_{\omega} \beta. \end{aligned} \quad (7)$$

В нашем случае:

$$\ddot{\varphi}_1 = \frac{Q_\varphi(\varphi, \dot{\varphi})}{I_{\tilde{n}_1} l^2 + I_{c_1}}. \quad (8)$$

Разность между уравнениями представляет исковую систему уравнений по определению возмущений:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_1 = \beta, \\ \dot{\beta} = \frac{1}{M_{c_1} l^2 + I_{c_1}} (Q_\varphi)'_{\varphi_1} \delta_1, \\ + \frac{1}{M_{c_1} l^2 + I_{c_1}} (Q_\varphi)'_{\alpha_1} \beta, \end{cases} \quad (9)$$

где:

$$\begin{aligned} (Q_\varphi)'_{\varphi_1} = & -R_{dy} \left( \sum_{i=1}^{22} l_{\tilde{a}1i} \sin(\psi_{l_i} + \varphi_1) - \right. \\ & \left. - \sum_{i=1}^{22} l_{\tilde{a}2i} \sin(\psi_{l_i} + \varphi_1) \right) + \\ & + R_{dx} \left( \sum_{i=1}^{22} l_{\tilde{a}1i} \cos(\psi_{l_i} + \varphi_1) - \right. \\ & \left. - \sum_{i=1}^{22} l_{\tilde{a}2i} \cos(\psi_{l_i} + \varphi_1) \right) + \\ & + 2R_{\tilde{e}x} l_{\tilde{e}} \cos(\varphi_1) + (R_{\tilde{a}y})'_{\varphi} \times \\ & \times \left( \sum_{i=1}^{22} l_{\tilde{a}1i} \cos(\psi_{l_i} + \varphi_1) - \right. \\ & \left. - \sum_{i=1}^{22} l_{\tilde{a}2i} \cos(\psi_{l_i} + \varphi_1) \right) + \\ & (R_{\tilde{a}y})'_{\varphi} \left( \sum_{i=1}^{22} l_{\tilde{a}1i} \sin(\psi_{l_i} + \varphi_1) - \right. \\ & \left. - \sum_{i=1}^{22} l_{\tilde{a}2i} \sin(\psi_{l_i} + \varphi_1) \right), \end{aligned} \quad (10)$$

$$(Q_\varphi)'_{\alpha_1} = K_{duc} \cdot l. \quad (11)$$

При детальном изучении затухающих колебаний (рис. 6) сравнивая угол смещения со скоростью изменения этого угла приходим к выводу, что система становится устойчивой через два цикла колебаний, что соответствует промежутку времени  $\approx 18$  сек. Устойчивое положение конструкция лущильника принимает с отклонением по углу  $\approx 6^\circ$  против часовой стрелки. При этом для лущильника отклонению  $6^\circ$  соответствует поперечное смещению  $\approx 0,17$  м.

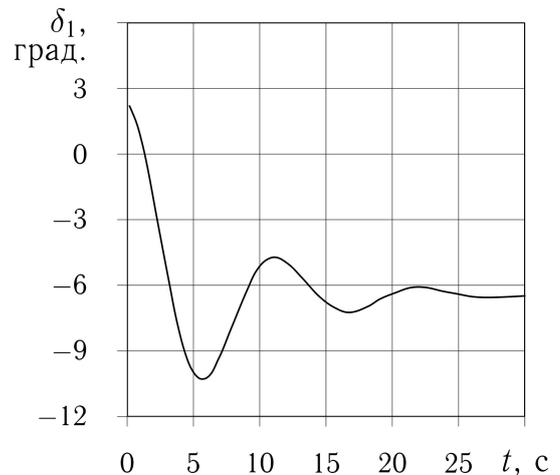


Рис. 6. Характер затухания возмущения колебаний при движении дискового лущильника ДЛ-5

При выбранных параметрах твердости почвы и рассчитанных сил реакции дисков для исходной конструкции без учета возмущающих сил, связанных с реальными условиями работы агрегата в результате решения систем дифференциальных уравнений были получены следующие результаты.

Наибольшее смещение по углу  $\varphi_z$  приводит к смещению дискового лущильника относительно направления движения агрегата вправо на  $0,065^\circ$ , что составляет 4 см.

По теории Конарева Ф.М. интенсивность изменения угла  $\varphi_z$  в основном зависит от угла наклона диска и меньше зависит от угла атаки и кинетической константы, которые определяют проекцию результирующей реакции почвы на сферический диск лущильника.

При анализе графической информации с учетом условий работы лущильника в диапазоне угла смещения точки лезвия диска —  $\omega t$  от 40 до 80 рад. влияние кинематической констан-

ты  $\lambda$  незначительно, а углы  $\alpha$  и  $\beta$  существенно сказываются на значениях  $v_e$ .

Геометрические параметры почвенного пласта включают в себя такие геометрические величины как:  $b$  — расстояние между смежными дисками;  $h$  — высоту продольного гребня, которая зависит от радиуса диска  $R$  и косинуса угла наклона диска.

При сравнении процессов рабочего взаимодействия отдельно взятых дисков с почвенным слоем на элементарных участках поля достаточно малой площади наибольшие отклонения проявляются в заглаблении дисков, связанные с микрорельефом поверхности, и различиями в плотности сложения поверхностного слоя на этих участках [4].

Исследование устойчивости дисков показало, что система становится устойчивой через два цикла колебаний, что соответствует промежутку времени  $\approx 18$  сек.

Для решения задач на устойчивость целесообразно использовать второй метод Ляпунова. Раскладываем систему уравнений в ряд Тейлора с точностью до первого порядка малости. Степень асимметрической устойчивости системы определяется величиной времени.

**Экспериментальная часть.** При выборе уравнений варьирования факторов, которые влияют на равномерность хода дисков по глубине с опорным катком, исходили из агротехнических требований, предъявляемых к посеву зерновых культур, условий работы дисковой системы и конструктивных ее колебаний. На момент проведения опыта влажность составила 22,5%.

Матрица планирования и полученные после обработки результаты приведены в таблице 1, где кодовые обозначения соответствуют  $x_1$  — скорость движения;  $x_2$  — глубина обработки;  $x_3$  — расстояние между дисками;  $x_4$  — угол наклона диска;  $x_5$  — угол сферы;  $y$  — тяговое сопротивление.

На основании результатов исследований составили уравнение регрессии, которое описывает влияние параметров на равномерность хода дисков по глубине:

$$y = 152,57 + 10,12x_1 + 17,78x_2 + 20,12x_3 - 15,7x_4 + 26,52x_5. \quad (12)$$

Коэффициенты данного уравнения регрессии получены с помощью метода наименьших квадратов. При этом погрешность в среднем

составляет около 20%. Для проверки адекватности модели определили  $F$ -критерий. Расчетное значение  $F$ -критерия составило 3,08, что больше табличного  $F = 2,798$  для 95%-го уровня значимости.

**Таблица 1.** Матрица планирования и результаты эксперимента

Факторы, № опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$y$
1	-	-	+	-	+	111,6
2	-	-	-	+	+	181,6
3	-	+	+	+	-	123,3
4	-	+	-	+	-	153,3
5	+	-	+	-	+	156,6
6	+	-	-	+	-	89,3
7	+	+	+	+	-	138,3
8	+	+	-	+	+	266,6

Анализ коэффициентов уравнения регрессии показывает, что экспериментальные исследования подтверждают теоретические исследования по оценке влияния факторов. Что касается степени влияния факторов, то наиболее сильное влияние на равномерность хода дисков оказывает глубина обработки, скорость движения, угол сферы и расстояние между дисками. А такие факторы как угол наклона диска для заданных интервалов их варьирования оказывает незначительное влияние на качество работы дисковой системы.

Для подтверждения достоверности принятой математической модели по определению влияния параметров экспериментального дискового лущильника на амплитуду его колебаний были проведены экспериментальные исследования. При этом выбрали четыре фактора, которые имели наиболее существенное влияние. Перед проведением экспериментальных исследований составили матрицу планирования полнофакторного эксперимента  $2^4$  с использованием  $\frac{1}{2}$  — реплики на двух уровнях варьирования факторов, обозначенных знаками «+» и «-», соответствующих верхнему и нижнему уровням.

Эксперименты проводили в полевых условиях в трех повторностях. Чтобы выполнить эту задачу, на поле разметили 8 участков для повторностей длиной по 50 м и шириной 7 м. Почва предварительно не обрабатывалась.

После этого для оценки амплитуды колебаний дискового лущильника принимали средне-

квадратическое отклонение от полученной траектории движения агрегата на пиковых точках от теоретической траектории.

Во время движения агрегата по соответствующим размеченным участкам рабочие органы дискового луцильника оставили след.

После этого замеряли расстояние от линии отсчета до крайних дисков луцильника на пиковых точках синусоиды слева и справа по ходу движения агрегата.

Затем на пиках по повторностям определили среднее значение расстояния от линии отсчета, которое соответствует значению расстояния до линии траектории движения центра дискового луцильника. При этом находили отклонения от теоретической траектории центра луцильника. Проверку достоверности влияния вариантов проводили по критерию Фишера.

Принятые кодовые обозначения и уровни варьирования параметров дискового луцильника приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Кодовое обозначение и уровни варьирования параметров дискового луцильника

Кодовое обозначение факторов	Наименование факторов	Единица измерения	Уровни варьирования	
			-	+
$x_1$	Диаметр диска	м	0,40	0,61
$x_2$	Глубина обработки	м	0,02	0,12
$x_3$	Угол наклона	град.	20	26

Матрица планирования и результаты проведения эксперимента приведены в табл. 3.

На основании экспериментальных данных построили уравнение регрессии, описывающие влияние параметров луцильника на амплитуду колебаний при выполнении технологического процесса.

$$y = 50,3 + 15,75x_1 + 11x_2 + 9,6x_3 + 5,58x_1x_2 + 4,41x_1x_3 - 1,16x_2x_3. \quad (13)$$

На основании экспериментальных данных построили уравнение регрессии, описывающие влияние на амплитуду колебаний при выполнении технологического процесса.

Качественные показатели работы дискового луцильника оценивались коэффициентом структурности почвы. Предложенная схема лу-

цильника позволяет за один проход обработать почву почвообрабатывающими дисками – ромашками и заделать поживные остатки предшественника. Эксперимент проводился на стерне подсолнечника при влажности 22% и скорости движения агрегата на разных передачах.

Структурный состав почвы до обработки луцильника и после представлены в таблице 4.

Достоверность результатов исследований составила 95%. Анализ результатов показал, что количество наиболее ценных комочков (1-20 мм) в поверхностном слое почвы, необходимые для сохранения влаги и повышения эффективности аэрации, при обработке составило 70,5%, а без обработки — 45,1%. Агротомически ценных фракций (10 - 25 мм), обеспечивающих полноценное развитие растений, в результате обработки почвы образовывалось 65,23%, т.е. в 1,4 раза больше, чем без обработки.

**Таблица 3.** Матрица планирования эксперимента

Факторы, № опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y$ , кН
1	-	-	-	30
2	-	+	-	40
3	-	-	0	32
4	-	+	0	44
5	-	-	+	38
6	-	+	+	50
7	0	-	-	25
8	0	+	-	43
9	0	-	0	33
10	0	+	0	63
11	0	-	+	40
12	0	+	+	55
13	+	-	-	36
14	+	+	-	74
15	+	-	0	42
16	+	+	0	80
17	+	-	+	78
18	+	+	+	103

Эксперимент планировался для выяснения влияния таких параметров как расстояние между дисками, расстояние между дисковыми секциями, угла атаки  $\alpha$  и угла наклона диска  $\beta$  на качество крошения почвы.

Опыты проходили на учебно-опытном поле ХНАУ им. В.В. Докучаева. Направление движения трактора осуществляли вдоль склона в пределах 1,5–4°. Длина гона составила 35–40 м. Отбор образцов почвы проводили тремя повторностями на одинаковых расстояниях (2–3 м)

по ходу движения агрегата. Скорость движения агрегата на базе трактора МТЗ-82 составила 12 км/ч. В качестве рабочего орудия применили усеченную секцию дискового лущильника ДЛ-5.

В качестве изменяющихся факторов было выбрано угол атаки  $\alpha$  (15–35°), угол наклона  $\beta$  (10–30°), а также удельное давление на диск в плавающем режиме и в режиме догрузки.

**Таблица 4.** Структурный состав почвы после прохода экспериментального лущильника

№ передачи	Повторность	Единицы измерения	Размер фракции, мм					$\Sigma$	кв %
			>2	2–3	3–5	5–7	>10		
I	1	Г	98	120	150	140	800	1308	0,46
		%	7,5	9,18	11,47	10,71	61,17	99,8	
	2	Г	105	160	132	160	780	1337	0,51
		%	7,86	11,97	9,88	11,97	58,34	99,7	
	3	Г	140	205	194	217	889	1645	0,61
		%	8,51	12,47	11,8	13,2	54,05	99,7	
II	1	Г	93	150	143	137	723	1246	0,63
		%	7,47	12,04	11,48	11	48,03	99,6	
	2	Г	85	164	170	163	507	1089	0,84
		%	7,81	15,06	15,61	14,97	46,56	99,8	
	3	Г	93	170	155	183	530	1131	0,82
		%	8,23	15,03	13,71	16,18	46,87	99,7	
III	1	Г	92	180	193	203	400	1068	1,1
		%	8,62	16,8	18,08	19,01	37,4	99,8	
	2	Г	82	154	170	167	520	1093	0,81
		%	7,51	14,09	15,56	15,28	47,58	99,9	
	3	Г	90	140	160	185	540	1115	0,76
		%	8,07	12,5	14,3	16,59	48,4	99,8	
IV	1	Г	98	190	170	200	456	1108	1,03
		%	8,84	17,1	15,3	18	40,6	99,7	
	2	Г	180	200	220	250	400	1250	1,1
		%	14,4	16	17,6	20	32	100	
	3	Г	140	203	215	250	450	1258	1,13
		%	11,1	18,1	17	19,8	35,7	99,7	

В качестве исследуемого фактора было принято количество агрономически ценных почвенных агрегатов в слое 0–10 см, а в качестве инструментария использовались сита для просеивания почвы с размерами отверстий: 10, 7 и 5 мм. Количество почвенной фракции определяли путем просеивания и взвешивания. Влажность почвы в слое 0–10 см составила 16%.

Результаты посева были систематизированы, разложены и взвешены. Для определения процентного содержания агрегатов по гранулометрической шкале были разделены на четыре фракции больше 10 см; 10–7 см; 7–5 см и меньше 5 см. Фракция меньше 5 см составляла

20%, остальные фракции имели значительные вариации по выбранной схеме исследования, которая приведена ниже в табл. 5.

На основе теории планирования эксперимента для 4-х параметров применяется сбалансированная схема с  $2^{k-1}$  вариантами. В нашем случае эта схема из 8 вариантов представлена в виде не зависимых переменных:  $x_1$  — значение угла атаки  $\alpha$  (15–35°);  $x_2$  — значение угла наклона диска  $\beta$  относительно оси  $z$  (10–30°);  $x_3$  — расстояние между соседними дисками (0,24–0,5 м);  $x_4$  — расстояние между дисковыми секциями (0,5–1,0 м);  $x_0$  — определение свободного члена в уравнении, описывающего, результирующий показатель качества — процент наличия в обработанном слое агрономически ценных почвенных частиц.

Результаты проведенных измерений процентного содержания агрономически ценных почвенных частиц по вариантам спланированного эксперимента представлены в табл. 5.

**Таблица 5.** Процентное содержание агрономически ценных частиц по проведенному эксперименту

Варианты	Схема	$\alpha$	$\beta$	$d$	$b$	Агрономически ценные частицы, %
1	----	15	10	0,5	0,8	16,9
2	++-	35	30	0,5	0,8	13,0
3	---+	15	10	1	1	21,5
4	+--	35	10	1	0,8	12,0
5	-++	15	30	1	0,8	10,4
6	+++	10	0,5	1	1	20,1
7	-++	15	30	0,5	1	9,1
8	+++	35	30	1	1	12,1

По результатам расчета коэффициентов статистической модели содержание агрономически ценных почвенных частиц определено существенное влияние угла  $\beta$  ( $x_2$ ), расстояния между секциями дисков ( $x_4$ ), взаимодействие угла  $\beta$  и расстояния между секциями дисков ( $x_{24}$ ), а также расстояние между отдельными дисками и секциями дисков ( $x_{34}$ ).

Для подтверждения достоверности полученной математической модели функциониро-

вания дискового луцильника провели полевые экспериментальные. В данном исследовании определяли отклонение экспериментального луцильника от заданной траектории движения.

Полевые эксперименты проводились при влажности почвы 22,5%. В результате прохода агрегата в составе трактора ХТЗ-17222 и экспериментального почвообрабатывающего орудия ДЛ-5 по заданной траектории движения на поверхности поля оставался след от рабочих органов дискового луцильника. Эксперимент проводили на разных передачах и в разных диапазонах трансмиссии. Глубина обработки почвы составила 8,5 см, данные по отклонению, дискового орудия представлены в табл. 6.

**Таблица 6.** Отклонение дискового луцильника от заданной траектории движения

Передача, $x_1$	Расстояние от точки отсчета (см), $x_2$	Повторность			
		1	2	3	у
II	80	3,5	-1	1	1,17
	85	0,5	-3	0	-0,83
	90	2	0	3	1,67
	105	0	0	4	1,33
III	80	8	2	8	6
	85	4,5	1	10	5,17
	90	5	3	5,5	4,5
	105	3,5	0	0	1,17

На основе экспериментальных данных построим уравнение регрессии, описывающее влияние параметров дисков на устойчивость его движения при выполнении технологического процесса:

$$y = -43,01 + 0,926x_2 + 0,495x_1^2 - 0,00057x_2^2 + 0,0922x_1x_2. \quad (14)$$

Значимость коэффициентов уравнения регрессии определили по критерию Стьюдента. Анализ коэффициентов уравнения регрессии показывает, что устойчивость движения дискового орудия от заданной траектории движения почвообрабатывающего агрегата оказывает уменьшение диаметра дисков.

В этом случае величина фактора скорости составляет 29,7% фактор расстояния – 8,32%, а взаимодействие скорости и расстояния 14,27%.

**Выводы.**

1. Данные экспериментов подтверждают теоретические исследования устойчивости движения дискового луцильника.

2. Экспериментальные исследования по изучению влияния работы луцильника показало, что наиболее сильное влияние на равномерность хода дисков на глубине оказывает скорость движения, что подтверждает достоверность результатов теоретических исследований.

3. Экспериментами определено, что тяговое сопротивление почвообрабатывающего диска большого диаметра меньше, чем аналогичного диска экспериментального луцильника.

4. На основании анализа уравнения регрессии, описывающего влияние параметров луцильника на амплитуду его колебаний установлено, что наиболее сильное влияние на параметр оказывает уменьшение диаметра диска, а с уменьшением массы луцильника амплитуда колебаний возрастает.

5. Использование ровного диска при обработке почвы обеспечивает уменьшение в 2,6 раза количества глыб размером более 20 мм, а также увеличение в 1,5 раза наиболее ценных структурных частиц размером 10 - 25 мм и в 2 раза коэффициента структурности.

6. Оборудование луцильника большим диаметром дисков способствует улучшению равномерности хода диска по глубине, что способствует повышению производительности в сравнении с серийными дисковыми орудиями.

7. Внедрение экспериментального дискового луцильника в технологию возделывания зерновых культур в сравнении с применением традиционной системы минимальной обработки почвы способствует увеличению урожайности. При этом затраты труда остались прежними, а расход топлива на единицу полученной продукции снизился в 2 раза.

**Литература**

1. Пащенко В.Ф. Методика построения математических моделей устойчивости функционирования механических систем / В.Ф. Пащенко, В.В. Ким. – Харьков: ХНАУ им. В.В. Докучаева, 2010. – 115 с.
2. Канарев Ф.М. Ротационные почвообрабатывающие машины и орудия / Ф.М. Канарев. – М.: Машиностроение, 1983. – 139 с.
3. Пат. РФ № 2190313. МКИ А 01 В 15/00 многокорпусный плуг / Н.Е. Рыжих, В.И. Фортуна, Г.Г. Маслов. Опубликовано 10.10.2000. Бюл. № 28.
4. Медведев В.В. Неоднородность почв и точнее земледелие / В.В. Медведев. – Харьков: «Типография №13». – 2007. – 296 с.

## Анотація

**Дослідження дискових робочих органів лущильника****В.Ф. Пащенко, С.О. Харченко, К.В. Сідих**

Розглянуто взаємозв'язок геометричних параметрів дисків лущильника з їх швидкістю обертання і параметрами орієнтації в просторі. Визначено розміри і форма ґрунтового пласта, виділень диском лущильника. Наведено розрахунок силових реакцій ґрунту на сферичну поверхню диска. При вирішенні завдань стійкості руху лущильника враховані дисипативні втрати енергії, а також застосовані методи Ляпунова і розкладання системи рівнянь в ряд Тейлора. Теоретичні дослідження перевірені експериментально. У процесі польових експериментів вивчено вплив параметрів лущильника на параметри якості обробки ґрунту, врожайність оброблюваної культури і техніко-економічні показники.

**Ключові слова:** ґрунт, взаємодія, розпушування, відхилення, стійкість руху, поверхня, диск, лущильник.

## Abstract

**Research working organs disc plows****V.F. Pashhenko, S.A. Harchenko, K.V. Sedyh**

The interrelation of the geometric parameters of disk harrows with their speed of rotation and the parameters of orientation in space. Determine the size and shape of the soil layer, detachable disc harrows. The calculation of the power of the soil reactions on the spherical surface of the disc. In solving problems of stability of motion plows into account dissipative energy losses, as well as applied methods of Lyapunov and the expansion of the system in a Taylor series. Theoretical studies verified experimentally. During field experiments to study the effect parameters plows on parameters of quality of the soil, crops of cultivated plants, and technical and economic indicators.

**Key words:** soil interaction loosening deviation, driving stability, surface drive Lushchilnik.

---

**Представлено: В.І.Мельник / Presented by: V.I.Mel'nik**

**Рецензент: В.В.Кім / Reviewer: V.V.Kim**

*Подано до редакції / Received: 22.04.2015*