

**Н.Н. Корчак, к.т.н., доц.****С.Н. Грушецкий, к.т.н., доц.***Подольский государственный аграрно-технический университет*

## **Теоретическое обоснование дискового рабочего органа для качественного разрезания стеблевых остатков кукурузы**

*Проведены теоретические исследования влияния дискового рабочего органа на процесс разрезания стеблевых остатков кукурузы, в частности исследовано динамику дискового рабочего органа и активизацию влияния на почву.*

*Исследование технологического процесса влияния дискового ножа на процесс разрезания стеблевых остатков даёт возможность научно обосновать конструктивные параметры дисковых рабочих органов.*

*Важнейшим объектом при процессе разрезания дисковым рабочем органом есть модели растительных остатков. Первичной функцией следует считать влияние дисковых ножей на стеблевые остатки кукурузы. Это влияние заключается в разрезании тех стеблей, которые попадают в зону действия ножей, а также в частичном их проворачивании. Такое проворачивание стеблей изменяет функцию распределения.*

*Теоретически доказано, что поперечные колебания способствуют измельчению почвенных макроагрегатов и приводят к уменьшению влияния агрегата на почву и к расширению полос обработки.*

*Результаты теоретически обоснованного дискового рабочего органа нашли своё использование в проектировании новой технологии измельчения растительных остатков кукурузы и разработке измельчителя для её реализации.*

*Получено дальнейшее развитие усовершенствования теоретических основ качественного разрезания стеблевых остатков кукурузы, в частности дисковых рабочих органов, используемых в комбинированных агрегатах.*

**Ключевые слова:** *дисковый нож; стеблевые остатки кукурузы; теоретическое обоснование; динамические свойства; влияние на процесс разрезания; почва.*

**Вступление.** Дисковые рабочие органы при предложенном способе обработки поля, засоренного растительными остатками кукурузы, состоящий из объединенных технологических процессов: разрезания и распределения растительных остатков, уплотнения свернутой массы, измельчения растительных остатков с почвой и выравнивания поверхности поля, осуществляют один из важнейших технологических процессов – разрезания стеблей в междурядьях, обеспечивая более эффективное протекание последующих процессов предложенного способа. Поэтому именно этот рабочий орган, который реализует технологический процесс, который он выполняет, требует тщательного теоретического обоснования влияния на процесс разрезания стеблевых остатков и почвы.

**Актуальность исследования.** Теоретическое обоснование технологического процесса влияния дискового рабочего органа на процесс разрезания растительных остатков даёт возможность научно обосновать конструктивные параметры дисковых рабочих органов. В связи с этим, научно-технологическая задача теоретического обоснования рабочего органа, который используется для разрезания стеблевых остатков, является весьма актуальной.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Дисковые рабочие органы используются в земледелии достаточно давно [1–5]. Основное их назначение – разрушение крупных глыб почвы, которые при определенных условиях образуются после вспашки [1]. Здесь имеется в виду, что ножи являются плоскими, выпуклые ножи имеют несколько другие функции. Выполняемые ими функции разнообразны, начиная от послеуборочного измельчения почвы, заканчивая измельчением растительных остатков и уничтожением сорняков. Есть несколько типичных форм дисков, из которых можно выделить плоские и выпуклые. Математическое описание динамических свойств плоских дисков достаточно мало исследовано в связи с решением других применений, выпуклые же мало исследованы [6–13]. При использовании дисковых рабочих органов для работы с почвой они считаются абсолютно жесткими. Однако экспериментальные исследования показывают, что обрабатываемая полоса почвы гораздо шире толщины диска. Это связано с недостаточным центрированием дисков на валу и с учетом упругих свойств диска. Безусловно, расширение ширины обрабатываемой почвенной полосы является положительной стороной применения диска. С этой точки зрения обе вышеназванные причины не играют отрицательной роли. Однако недостаточное центрирование диска на валу приводит к быстрому износу как вала, так и диска, и акцентирование этого способа нежелательно. Более надежным является

учет упругих свойств диска (однако, в этом случае начинают играть значительную роль процессы старения металла). При расчете динамики дискового рабочего органа для обработки почвы, засоренной стеблевыми остатками, его упругие свойства до настоящего времени не использовались.

**Цель статьи** – теоретически обосновать влияние дискового рабочего органа на качество разрезания стеблевых остатков кукурузы.

**Методика исследований.** Теоретическими исследованиями предусмотрено изучить влияние дискового рабочего органа на качество разрезания стеблевых остатков кукурузы, динамику дискового рабочего органа и активизацию влияния на почву, вывести необходимые математические зависимости.

Исходными данными для теоретических исследований были приняты: размеры междурядья, свойства стеблей, пространственная размерная и механико-технологическая характеристика стеблевой массы.

Теоретические обоснования динамического анализа дискового рабочего органа проводили с использованием математики, физики, теоретической механики и теории земледельческой механики.

**Результаты исследований.** Важнейшим объектом при процессе разрезания дисковым ножом есть модели растительных остатков (листочестебельных и корневых). Такие объекты, в частности их физико-механические свойства, мало изучены, поэтому используемые модели будут исследованы впервые.

Исследуя влияние дискового ножа на почву, рассмотрим следующую модель (рис. 1). Пусть мы имеем круглую пластину 1 с цилиндрической жесткостью  $P$  на изгиб:

$$P = \frac{E \cdot a^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга материала пластины;

$a$  – толщина пластины;

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

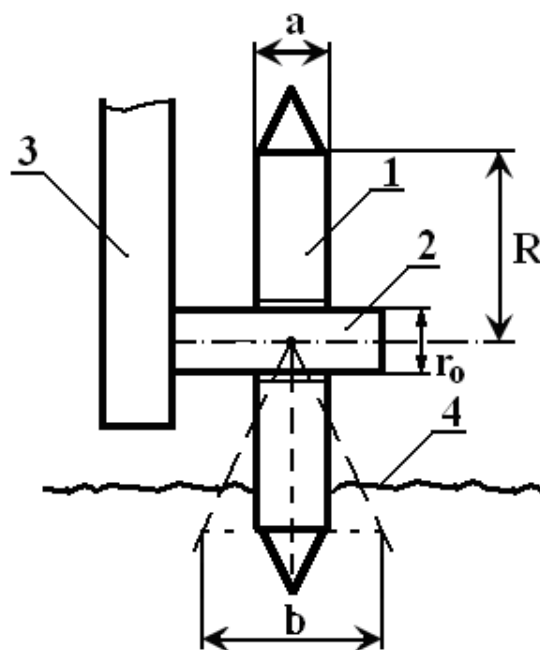


Рис. 1. Схема влияния дискового ножа на почву: 1 – дисковый нож; 2 – вал; 3 – стойка; 4 – почва

Дисковый нож 1 закреплен на валу 2 радиусом  $r_0$ , который консольно закреплен на вертикальной стойке 3. Вал 2 и стойка 3 жесткие, их поступательное горизонтальное движение со скоростью  $V_0$ , которая является сравнительно небольшой, и вопрос о потере упругой устойчивости диска можно не рассматривать [14]. Внешние воздействия на диск со стороны почвы 4 могут быть учтены через коэффициент постели [15], но это влияние также незначительно и его несимметричность при реальных силовых действиях не приводит к возникновению узловых диаметров и, с другой стороны, позволяет рассматривать только собственные колебания узловых окружностей. Динамическое уравнение поперечных колебаний имеет следующий вид [6] для амплитудной функции:

$$\nabla^2 \nabla^2 \omega - \alpha^4 \omega = 0; \quad \alpha^2 = P^2 \cdot \frac{12\rho(1-\nu^2)}{Ea^3}, \quad (2)$$

где  $\nabla^2 \nabla^2$  – бигармонический оператор в полярной системе координат:

$$\nabla^2 \nabla^2 \omega = \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{r^2 \partial \varphi^2} - \alpha^2 \right) \cdot \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{r^2 \partial \varphi^2} + \alpha^2 \right). \quad (3)$$

В отсутствии узловых диаметров ( $n = 0$ ) общее решение может быть представлено в виде [8]:

$$\omega(r) = C_1 J_0(\alpha r) + C_2 Y_0(\alpha r) + C_3 I_0(\alpha r) + C_4 K_0(\alpha r), \quad (4)$$

где  $J_0(\alpha r)$ ,  $I_0(\alpha r)$  – функции Бесселя первого рода нулевого порядка;

$Y_0(\alpha r)$ ,  $K_0(\alpha r)$  – модифицированные функции Бесселя;

$C_i (i = 1-4)$  – константы интегрирования, зависящие от краевых условий:

$$\omega(r_0) = \frac{\partial \omega}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = 0; \quad \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} \Big|_{r=R} = \frac{\partial^3 \omega}{\partial r^3} \Big|_{r=R} = 0, \quad (5)$$

Дальнейший анализ и получение собственных частот относительно несложные, включая вычисления достаточно громоздких частотных уравнений и применения рекуррентных формул для функций Бесселя [16]. Поэтому для дисков, в которых внешний диаметр большой по сравнению с диаметром вала ( $R \gg r_0$ ), целесообразно применить метод Ритца [6] и выбрать в качестве минимизационной функции для срединной линии функцию:

$$\omega(r) = \alpha(r - r_0)^S, \quad (6)$$

где  $S$  – параметр, значение которого подбирается из условия минимума частот колебаний (А.Стодола).

Таким образом, учитывая начальные условия, можно получить величину отклонения края диска ( $r = R$ ) от исходного положения  $\omega(R)$ . Данное отклонение принимает участие в расширении полосы обработки. Эта ширина становится равной:

$$2\omega(R) + a = b, \quad (7)$$

Кроме того, поперечные колебания способствуют измельчению почвенных макроагрегатов и приводят к уменьшению влияния агрегата на почву, что позволяет существенно расширить полосу обработки.

Для рассмотрения динамических процессов можно использовать такие модели:

- вязко-упругая среда (на определенных этапах процесса);
- реологические модели.

Числовые параметры для этих моделей могут быть получены в результате экспериментальных исследований.

Отдельно следует рассмотреть модель растительных остатков на собранном поле. Специфика этой модели, по сравнению с вышерассмотренными моделями, заключается в том, что эта модель геометрическая. В отличие от вышерассматриваемых моделей нами проведены экспериментальные исследования в полевых условиях. На базе экспериментальных исследований и строится эта модель [17–18].

Дискретное описание размещения листостебельных остатков не совсем удобное для дальнейшего описания динамических процессов, которые описывают взаимодействие полевой установки с растительными остатками, поэтому дальнейший анализ связан с введением непрерывной функции распределения  $N(\varphi, x)$ , где  $\varphi$  – угол размещения стеблей остатков относительно направления движения установки (ось  $Ox$ ),  $N$  – количество стеблей. В дальнейшем зависимость  $N(x)$  может быть принята постоянной величиной (равномерное распределение остатков вдоль движения или почти равномерное).

Это условие может быть записано в следующем виде:

$$\frac{|N_1 - N_2|}{N_1 + N_2} \ll \frac{|X_1 - X_2|}{X_1 + X_2}, \quad (8)$$

где  $N_1, N_2$  – количество растительных остатков в точках  $X_1$  и  $X_2$ .

Нами используются плоские ножи, однако особенность их использования значительно отличается от традиционного. Во-первых, они используются до пахоты, то есть речь не может идти о разрезании массивных глыб – они к пахоте просто отсутствуют. Поэтому эта функция дисковых ножей является вторичной. Первичной функцией следует считать влияние дисковых ножей на листостебельные остатки кукурузы.

Это влияние заключается в разрезании тех стеблей, которые попадают в зону действия этих ножей, а также в частичном их проворачивании.

Такое проворачивание стеблей меняет функцию распределения  $N(\varphi)$ . Качественное изображение измененной функции распределения изображено на рисунке 2 (пунктирная кривая).

В границах функции распределения диаграмма распределения растительных остатков на поверхности поля может быть изображена графически (рис. 2).

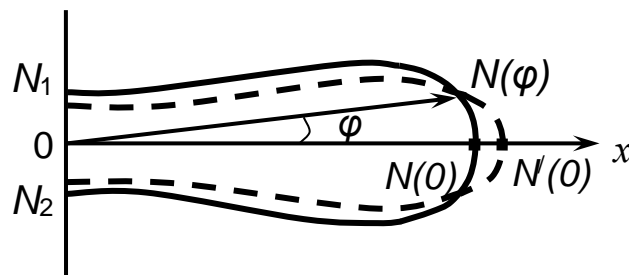


Рис. 2. Функция распределения растительных остатков  $N(\varphi)$  в полярной системе координат

В пределах функции распределения можно выразить разные вышепересмотренные величины, а именно:

– математическое ожидание:

$$N_{cp} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} N(\varphi) d\varphi ; \quad (9)$$

– математическое ожидание квадрата ожидаемой величины:

$$N^2 = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} N^2(\varphi) d\varphi ; \quad (10)$$

– дисперсия:

$$D(N) = N^2 - N_{cp}^2 . \quad (11)$$

Понятно, что вид функции распределения  $N(\varphi)$  зависит от многих факторов (условия сбора, уборочные устройства, сорт кукурузы и т. д.).

*Исследование динамики дискового ножа.* Для дальнейшего анализа работы дискового ножа считаем, что он абсолютно жесткий, свободно закреплен на горизонтальной оси (сопротивление трения на оси можно учитывать). Поперечное сечение (радиальное) представляет собой прямоугольник, на одной из меньших сторон которого находится равнобедренный треугольник (зона заточки). Поскольку использование дисковых ножей происходит к пахоте, и резкие изменения плотности и твердости почвы отсутствуют, то можно принять почву как сплошную однородную среду как по глубине (небольшое углубление ножа – до 5 см), так и по горизонту. Незначительные флуктуации, которые носят стохастический характер, в принципе могут быть учтены. Но, во-первых, следует иметь экспериментальные результаты, а подобные исследования не проводились. Во-вторых, такое учтивание значительно усложняет математические расчеты. Пусть радиус диска равен  $R$ , толщина  $a$ , высота заточки  $b$ , глубина погружения диска в почву равна  $h$ , причем  $h > b$ . Считая почву сплошной средой, запишем силу влажного трения в виде:

$$F_c = \beta \cdot V ; \quad \beta = \beta' \cdot S , \quad (12)$$

где  $F_c$  – сила влажного трения, Н;

$V$  – поступательная скорость агрегата, м/с;

$\beta$  – коэффициент пропорциональности, который определяется экспериментально, Н·с/м;

$\beta'$  – коэффициент трения, Н·с·м;

$S$  – площадь контакта, м<sup>2</sup>.

Понятно, что коэффициент пропорциональности  $\beta$  зависит от площади контакта. Трение между диском и листовыми остатками может быть принято сухим (закон Кулона), поскольку площадь контакта относительно невелика.

Расчетная схема дискового ножа приведена на рисунке 3.

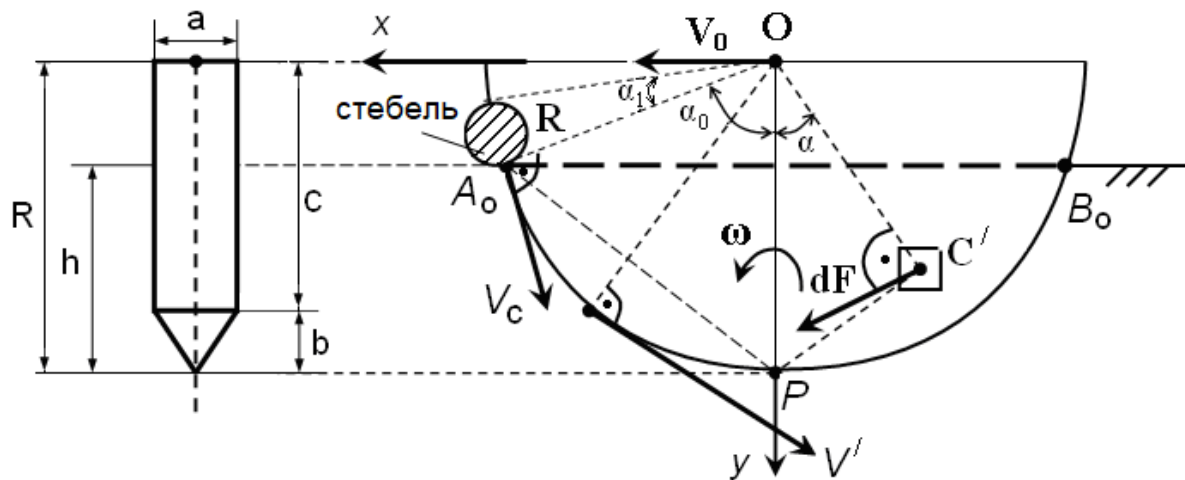


Рис. 3. Расчетная схема дискового ножа

Диск выполняет плоское поступательно-вращательное движение.  $V_0$  – скорость движения агрегата,  $P$  – мгновенный центр скоростей диска. Если обозначить радиус диска через  $R = c + b$ , то угловая скорость вращения будет равна:

$$\omega = \frac{V_0}{R} = \frac{V_0}{c + b}. \quad (13)$$

Обозначим диаметр стебля, который попадает в зону действия дискового ножа, через  $d$ . Тогда время взаимодействия ножа и стебля равно  $t$ :

$$t = \frac{d}{V_c \cdot \sin \varphi}, \quad (14)$$

где  $V_0$  – линейная скорость диска, которая может быть определена из следующего соотношения:

$$\frac{V_0}{R} = \frac{V_c}{R \cdot \sin \frac{1}{2} \left( \alpha_0 + \frac{\alpha_1}{2} \right)} = \omega; \quad \varphi = \frac{1}{2} \left( \alpha_0 + \frac{\alpha_1}{2} \right). \quad (15)$$

$$\text{Отсюда } V_c = V_0 \cdot \sin \frac{1}{2} \left( \alpha_0 + \frac{\alpha_1}{2} \right), \quad (16)$$

где  $V_c$  – линейная скорость точек на ободе диска.

Эти выражения справедливы только в том случае, когда стебель находится горизонтально на поверхности почвы.

Рассмотрим силу трения между дисковым ножом и почвой, а также между диском и разрезанными стеблевыми остатками. Для этого введем декартовую систему  $xOy$  (рис. 3). Выделим элементарную поверхность на диске площадью  $dx dy$ . Координаты центра этой площади:  $x$  ( $|x| \leq R \cdot \cos \alpha_0$ ) и  $y$  ( $R - h \leq y \leq R$ ). Согласно теореме о мгновенном центре скоростей справедливым есть следующее выражение:

$$V_{c'} = V_0 \cdot \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R}. \quad (17)$$

Тогда сила трения, действующая на эту площадь, равна:

$$dF = \left( \frac{\beta'}{V_{c'}} \right) dS = \frac{\beta'}{V_{c'}} dx dy. \quad (18)$$

В проекции на ось  $Ox$ :

$$dF_x = \left( \frac{\beta'}{V_{c'}} \right) \sin \alpha dx dy. \quad (19)$$

Сила трения, действующая на всю углубленную в почву площадь в проекции на ось  $x$ , определяется выражением:

$$F_x = \int_S dF_x = \int_{-R \cdot \sin \alpha_0}^{R \cdot \sin \alpha_0} \int_{R-h}^R \left( \frac{\beta'}{V_{c'}} \right) \sin \alpha \, dy \, dx. \quad (20)$$

Или с учетом выражения (10):

$$F_x = \frac{V_0 \beta'}{R} \int_{-R \cdot \sin \alpha_0}^{R \cdot \sin \alpha_0} \int_{R-h}^R \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \frac{x \, dx \, dy}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{V_0 \cdot \beta'}{R} \int_{-R \cdot \sin \alpha_0}^{R \cdot \sin \alpha_0} x \, dx \int_{R-h}^R dy. \quad (21)$$

Двойной интеграл разделился, что позволяет в законченном виде провести интегрирование, и результат относительно несложного интегрирования может быть записан в следующем виде:

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{V_0 \cdot \beta'}{2R} \cdot [R^2 \sin^2 \alpha_0 + R^2 \sin^2 \alpha_0] \cdot [R^2 - (R-h)^2] = \\ &= V_0 \cdot \beta' \cdot R \sin^2 \alpha_0 \cdot (h^2 - 2R \cdot h) = V_0 \cdot \beta' \cdot R \frac{\sqrt{h^2 - 2R \cdot h}}{R} \cdot (h^2 - 2R \cdot h) = \\ &= V_0 \cdot \beta' (h^2 - 2R \cdot h)^{\frac{3}{2}}. \end{aligned} \quad (22)$$

Для обеспечения равномерного вращения диска тяговое усилие  $F_0'$  должно быть большим или равным силе:

$$F_0' \geq F_x + F_n + F_c, \quad (23)$$

где  $F_x$  – сила трения;

$F_n$  – лобовое сопротивление диска в почве;

$F_c$  – сила трения диска по разрезанным стеблевым остаткам.

Сила лобового сопротивления почвы после несложных вычислений может быть подана в следующем виде:

$$F_n = \rho \cdot S_1 \cdot V_0^2 = \rho \cdot V_0^2 \cdot \left[ a(h-b) + \frac{ab}{2} \right], \quad (24)$$

где  $\rho$  – средняя плотность почвы в зоне обработки.

Для вычисления  $F_{cx}$  принимаем силу резания стебля равной  $F_p$ . Время резания определяется выражением (14), другими словами, сила трения  $F_c$  носит импульсный характер.

Вводим усредненное значение силы трения диска  $F_c$  по разрезанным стеблевым остаткам:

$$F_c = \sum_{i=1}^{t+\tau} \int_{\tau}^{t+\tau} F(t) \, dt = F_p \frac{t}{t+\tau}, \quad (25)$$

где  $\tau$  – интервал между последовательными импульсами, который зависит от функции распределения  $N(\varphi)$ ;

$t + \tau$  – интервал через определенный промежуток времени  $t$ .

Тогда проекция силы трения на ось  $x$ :

$$F_{cx} = \frac{t}{t+\tau} F_p \cdot \sin(\alpha + \alpha_0), \quad (26)$$

где  $F_p$  – сила резания;

$\alpha$  – угол между радиус-вектором  $dS$  и вертикалью;

$\alpha_0$  – угол между вертикалью ( $Oy$ ) и радиус-вектором стебля.

Сила трения  $F_x$  может быть записана:

$$\begin{aligned} F_x &\geq 2\beta' V_0 (h^2 - 2R \cdot h)^{\frac{3}{2}} + \rho \cdot V_0^2 \left( a(h-b) + \frac{a \cdot b}{2} \right) + \\ &+ \frac{t}{t+\tau} F_p \cdot \sin(\alpha + \alpha_0). \end{aligned} \quad (27)$$

Проанализируем зависимость силы трения  $F_x$  от угла вращения диска  $\varphi$ . Для этого обозначим первые два слагаемых в выражении (27) через  $F_x''$  и  $F_x'''$ . Тогда получим:

$$F_x = F_x'' + F_x''' \frac{d}{V_c \cdot \sin \varphi \left( \tau + \frac{d}{V_c \cdot \sin \varphi} \right)} = F_x'' + F_x''' \cdot \frac{d}{\tau \cdot V_c \cdot \sin \varphi + d}; \quad (28)$$

$$F_x''' = F_p \cdot \sin(\alpha + \alpha_0),$$

где  $F_x''$  – составляющая силы трения, которая не зависит от угла вращения дискового ножа  $\varphi$ ;

$F_x'''$  – составляющая силы трения, которая зависит от угла вращения дискового ножа  $\varphi$ .

Рассмотрим наиболее актуальную ситуацию «тонкие стеблевые остатки – небольшая засоренность»:

$$\frac{d}{\tau \cdot V_c} \ll 1. \quad (29)$$

В этом случае:

$$\frac{dF_x}{d\varphi} = -\frac{F_x'''}{\tau \cdot V_c} \cdot \frac{\cos \varphi}{\sin^2 \varphi}; \quad \frac{F_x}{\tau \cdot V_c} = const. \quad (30)$$

Минимум функции  $F_x(\varphi)$  достигается в точках  $\varphi_k = \frac{\pi}{2}$  и равен:

$$F_{x \min} = F_x'' + \frac{2F_x'''}{\pi \cdot \tau \cdot V_c}. \quad (31)$$

Зависимость  $F_x(\varphi)$  для случая (1) приведена на рисунке 4.

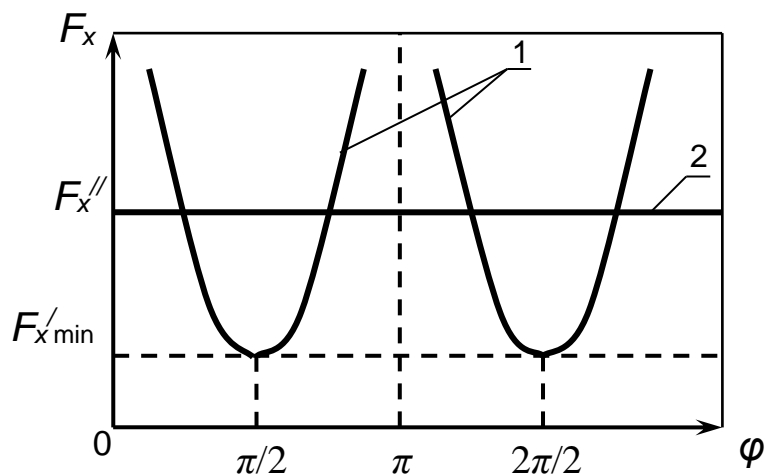


Рис. 4. Зависимость силы трения  $F_x$  от угла вращения дискового ножа  $\varphi$  для случаев: 1 – тонкие стеблевые остатки – небольшая засоренность; 2 – толстые стебли – большая засоренность

В случае «толстые стебли – большая засоренность» выполняется неравенство:

$$\frac{d}{\tau \cdot V_c} \gg 1. \quad (32)$$

Зависимость

$$F_x = F_x'' + F_x''' \quad (33)$$

приведена на рисунке 4 (прямая 2).

Следовательно, проведенный теоретический анализ показывает целесообразность разработки рабочего органа для разрезания стеблевых остатков кукурузы, который частично рассматривался в публикациях [19–20].

Теоретически обоснованный рабочий орган для разрезания стеблевых остатков в междурядьях научно обоснован [21] и был рассмотрен авторами при разработке измельчителя растительных остатков кукурузы [22–27].

#### Выводы и предложения:

1. Влияние дискового ножа на стеблевые растительные остатки изменяет функцию распределения растительных остатков на поверхности поля  $N(\varphi)$ ;

2. Теоретически обоснованы динамические свойства влияния дискового ножа на процесс измельчения стеблевых остатков кукурузы;

3. Исследовано вплив дискового ножа на ґрунт і доведено, що поперечні коливання сприяють дробленню ґрунтових макроагрегатів і призводять до зменшення впливу агрегата на ґрунт і розширення смуги обробки;

4. Результати теоретично обґрунтованого дискового робочого органу знайшли своє застосування в проектуванні нової технології дроблення рослинних залишків кукурудзи і розробке дробильника для її реалізації;

5. Отримано подальше вдосконалення теоретичних основ якісного розрізання стеблових залишків кукурудзи, в частині дискових робочих органів, використовуваних в комбінованих агрегатах.

#### Список использованной литературы:

1. Сільськогосподарські та меліоративні машини / Д.Г. Войтюк, В.О. Дубровін, Т.Д. Іщенко та ін. ; за ред. Д.Г. Войтюка. – К. : Вища освіта, 2004. – 544 с.
2. Войтюк Д.Г. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку / Д.Г. Войтюк, В.М. Барановський, В.М. Булгаков. – К. : Вища освіта, 2005. – 464 с.
3. Гуков Я.С. Обробіток ґрунту. Технологія і техніка. Механіко-технологічне обґрунтування енергозберігаючих засобів для механізації обробітку ґрунту в умовах України / Я.С. Гуков. – К. : Нора-Пріма, 1999. – 275 с.
4. Сучасні тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарської техніки / за ред. В.І. Кравчука, М.І. Грицишина, С.М. Ковалюк. – К. : Аграрна наука, 2004. – 396 с.
5. Комбіновані ґрунтообробно-посівні машини / М.П. Білоткач, О.М. Білоткач, В.Я. Ковальов, А.І. Мороз // Науковий вісник Національного аграрного університету : збірник наукових праць. – К., 2004. – Вип. 73. – Ч. 1. – С. 260–265.
6. Бабаков И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков. – М. : Наука, 1968. – 560 с.
7. Шнеэ Я.И. Аварии паровых турбин / Я.И. Шнеэ, А.В. Сахнин, Н.Н. Харитоноов. – М., 1936. – 256 с.
8. Ridky K. Vlit rotacni a plusni technologie orbi na pudni mikrofloru / K.Ridky // Zemedelska technika. – 1964. – V. 10, № 12. – P. 761–770.
9. Jankowski W. Wlosh plug rotacyjny pionowy / Jankowski // Mechanizacja rolnictwa. – 1961. – V. 8, № 1. – P. 25–26.
10. Pascal J.A. Rotary soil working machines / J.A. Pascal // Farm Mechanisation. – 1967. – V. 19, № 211. – P. 24–26, 29.
11. Gach S. Maszyny rolnicze. Elementy teorii i obliczeń / S.Gach, J.Kuczewski, C.Waszkiwicz. – Warszawa : SGGW, 1991. – 664 p.
12. Kuczewski J. Mechanizacja rolnictwa. Maszyny i urządzenia do produkcji roślinnej i zwierzęcej / J.Kuczewski, C.Waszkiwicz. – Warszawa : SGGW, 1997. – 552 p.
13. Woźniak W. Ciągniki i maszyny rolnicze. Budowa, przeznaczenie / W.Woźniak. – Poznań : PIMR, 2002. – 905 p.
14. Кэмпбелл В. Аксиальная вибрация дисков паровых турбин и меры защиты от нее / В.Кэмпбелл. – М. : Энергоиздат, 1937. – С. 84.
15. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко. – М. : Физматгиз, 1959. – 371 с.
16. Уиттекер Э.Т. Курс современного анализа / Э.Т. Уиттекер, Дж.Н. Ватсон. – М., 1963. – 342 с.
17. Корчак М.М. Дослідження характеру засміченості поля листостебловими та корневими залишками після збирання кукурудзи / М.М. Корчак, С.В. Єрмаков // Збірник наукових праць ПДАТУ. – Кам'янець-Подільський, 2007. – Вип. 15. – С. 498–504.
18. Problems of field contamination when growing energy corn as monoculture / M.Korchak, S.Yermakov, V.Maisus, I.Zavadskaya // 6th International Conference – Renewable Energy Sources (E3S Web of Conferences. Krynica, Poland, 2020). – Vol. 154. DOI: 10.1051/e3sconf/202015401009.
19. Features of weediness of the field by root residues of corn / Mykola Korchak, Serhii Yermakov, Taras Hutsol etc. // Environment. Technology. Resources : Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference. – Rezekne, Latvia, 2021. – Vol. 1. – P. 122–126. DOI: 10.17770/etr2021vol1.6541.
20. Development of technology for the hemp stalks preparation / Victor Sheichenko, Ihor Marynchenko, Ihor Dudnikov, Mykola Korchak // Independent Journal of Management and Production ; State agrarian and engineering university in Podilia. – 2019. – Vol. 10, № 7. – P. 687–701 [Electronic recourse]. – Access mode: <http://www.ijmp.jor.br/index.php/ijmp/article/view/913>.
21. Пат. № 146178 Україна, МПК (2021.01), А01В 33/00, А01В 79/00. Спосіб обробітку поля, засміченого рослинними залишками грубостеблових культур з вдосконаленням процесу розрізання стебел / Корчак М.М. – № u 2020 06391; заявл. 02.10.2020 ; опубл. 20.01.2021, Бюл. № 3.
22. Корчак М.М. Удосконалення механізації обробітку ґрунту після збирання кукурудзи з розробкою комбінованого способу обробітку поля / М.М. Корчак // Матеріали І Міжнародної наукової конференції з міждисциплінарних досліджень (19–21 січня 2021 року). – Берлін, Німеччина, 2021. – С. 1023–1029.
23. Корчак М.М. Обґрунтування технологічної функціональної моделі способу обробітку ґрунту після збирання грубостеблових культур / М.М. Корчак // Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету. – Кам'янець-Подільський, 2016. – Вип. 24, Ч. 2. – С. 165–174.
24. Корчак М.М. Дослідження комбінованого подрібнювача рослинних залишків / М.М. Корчак // LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 73 с.
25. Корчак М.М. Аналіз результатів пошукових експериментальних досліджень подрібнювача рослинних залишків грубостеблових культур / М.М. Корчак // Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. – Кам'янець-Подільський, 2017. – Вип. 25. – С. 99–114.



26. Корчак М.М. Обґрунтування енергетичних показників подрібнювача рослинних залишків грубостеблових культур / М.М. Корчак // Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету. – Кам'янець-Подільський, 2015. – Вип. 23. – С. 103–125.
27. Пат. 141263 Україна, МПК А 01 В 49/02 (2006.01). Комбінований подрібнювач рослинних залишків грубостеблових культур з напрямними елементами / Корчак М.М. – № u2019 10350 ; заявл. 15.10.2019 ; опубл. 25.03.2020, Бюл. № 6.

#### References:

- Vojtjuk, D.G., V.O. Dubrovin, Ishhenko, T.D ta in. (2004), *Sil's'kogospodars'ki ta melioratyvni mashyny*, in Vojtjuk, D.G. (ed.), Vyshha osvita, K., 544 p.
- Vojtjuk D.G., Baranovskiy, V.M. and Bulgakov, V.M. (2005), *Sil's'kogospodars'ki mashyny. Osnovy teorii' ta rozrahunku*, Vyshha osvita, K., 464 p.
- Gukov, Ja.S. (1999), *Obrobitok g'runtu. Tehnologija i tehnika. Mehaniko-tehnologichne obg'runtuvannja energozberigajuchyh zasobiv dlja mehanizacii' obrobitku g'runtu v umovah Ukrai'ny*, Nora-Prima, K., 275 p.
- Kravchuk, V.I., Grycushyn, M.I. and Koval', S.M. (ed.) (2004), *Suchasni tendencii' rozvytku konstrukcij sil's'kogospodars'koi' tehniky*, Agrarna nauka, K., 396 p.
- Bilotkach, M.P., Bilotkach, O.M., Koval'ov, V.Ja. and Moroz, A.I. (2004), «Kombinovani gruntoobrobno-posivni mashyny», *Naukovyj visnyk Nacional'nogo agrarnogo universytetu*, zbirnyk naukovyh prac', K., Vol. 73, Part 1, pp. 260–265.
- Babakov, I.M. (1968), *Teoriya kolebanii*, Nauka, M., 560 p.
- Shnee, Ya.I., Sakhnin, A.V. and Kharitonov, N.N. (1936), *Avarii parovykh turbin*, M., 256 p.
- Ridky, K. (1964), «Vlit rotacni a plusni technologie orbi na pudni mikrofloru», *Zemelska tehnika*, Vol. 10, No. 12, pp. 761–770.
- Jankowski (1961), «Wlosh plug rotacyjny pionewy», *Mechanizacja rolnictwa*, Vol. 8, No. 1, pp. 25–26.
- Pascal, J.A. (1967), «Rotary soil working machines», *Farm Mechanisation*, Vol. 19, No. 211, pp. 24–26, 29.
- Gach, S., Kuczewski, J. and Waszkiewicz, C. (1991), *Agricultural machinery. Elements of theory and calculations*, SGGW, Warszawa, 664 p.
- Kuczewski, J. and Waszkiewicz, C. (1997), *Mechanization of agriculture. Machines and devices for crop and livestock*, SGGW, Warszawa, 552 p.
- Woźniak, W. (2002), *Tractors and agricultural machinery. Construction, appointment*, PIMR, Poznań, 905 p.
- Kempbell, V. (1937), *Aksial'naya vibratsiya diskov parovykh turbin i mery zashchity ot nee*, Energoizdat, M., p. 84.
- Timoshenko, S.P. (1959), *Kolebaniya v inzhenernom dele*, Fizmatgiz, M., 371 p.
- Uittekter, E.T. and Watson, Dzh.N. (1963), *Kurs sovremennoho analiza*, M., 342 p.
- Korchak M.M. and Jermakov S.V. (2007), «Doslidzhennja harakteru zasmichenosti polja lystostebel'nymy ta korenevymy zalyshkami pislja zbyrannja kukurudzy», *Zbirnyk naukovyh prac' PDATU*, Kam'janec'-Podil's'kij, Issue 15, pp. 498–504.
- Korchak, M., Yermakov, S., Maisus, V. and Zavads'kaya, I. (2020), «Problems of field contamination when growing energy corn as monoculture», *6th International Conference – Renewable Energy Sources*, E3S Web of Conferences. Krynica, Poland, Vol. 154, doi.: [org/10.1051/e3sconf/202015401009](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015401009).
- Korchak, M., Yermakov, S., Hutsol, T., Burko, L. and Tulej, W. (2021), «Features of weediness of the field by root residues of corn», *Environment. Technology. Resources*, Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference, Rezekne, Latvia, Vol. 1, pp. 122–126, doi: [10.17770/etr2021vol1.6541](https://doi.org/10.17770/etr2021vol1.6541).
- Sheichenko, Victor, Marynchenko, Ihor, Dudnikov, Ihor and Korchak Mykola (2019), «Development of technology for the hemp stalks preparation», *Independent Journal of Management and Production*, State agrarian and engineering university in Podilia, Vol. 10, No. 7, pp. 687–701, [Online], available at: <http://www.ijmp.jor.br/index.php/ijmp/article/view/913>
- Korchak, M.M. (2021), *Sposib obrobitku polja, zasmichenoho roslynnyy zalyshkamy grubosteblovykh kul'tur z vdoskonalennjam procesu rozrizannja stebel*, Ukraine Patent No. 146178, MPK (2021.01) A01V 33/00, A01V 79/00.
- Korchak, M.M. (2021), «Udoskonalennja mehanizacii' obrobitku g'runtu pislja zbyrannja kukurudzy z rozrobkoju kombinovanoho sposobu obrobitku polja», *Materialy I Mizhnarodnoi' naukovo' konferencii' z mizhdyscyplinarnykh doslidzen' (19–21 sichnja 2021 roku)*, Berlin, Nimechchyna, pp. 1023–1029.
- Korchak, M.M. (2016), «Obg'runtuvannja tehnologichnoi' funkcional'noi' modeli sposobu obrobitku g'runtu pislja zbyrannja grubosteblovykh kul'tur», *Zbirnyk naukovyh prac' Podil's'kogo derzhavnogo agrarno-tehnichnogo universytetu*, Kam'janec'-Podil's'kij, Issue 24, Part 2, pp. 165–174.
- Korchak, M.M. (2019), *Doslidzhennja kombinovanoho podribnjuvacha roslynnykh zalyshkiv*, LAP LAMBERT Academic Publishing, 73 p.
- Korchak, M.M. (2017), «Analiz rezul'tativ poshukovykh eksperymental'nykh doslidzen' podribnjuvacha roslynnykh zalyshkiv grubosteblovykh kul'tur», *Podil's'kij visnyk: sil's'ke gospodarstvo, tehnika, ekonomika*, Kam'janec'-Podil's'kij, Issue 25, pp. 99–114.
- Korchak, M.M. (2015), «Obgruntuvannja energetychnykh pokaznykiv podribnjuvacha roslynnykh zalyshkiv grubosteblovykh kul'tur», *Zbirnyk naukovyh prac' Podil's'kogo derzhavnogo agrarno-tehnichnogo universytetu*, Kam'janec'-Podil's'kij, Issue 23, pp. 103–125.
- Korchak, M.M. (2020), *Kombinovanyj podribnjuvach roslynnykh zalyshkiv grubosteblovykh kul'tur z naprjammymy elementamy*, Ukraine Patent No. 141263, MPK A 01 V 49/02 (2006.01).

**Корчак** Микола Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії і системотехніки Подільського державного аграрно-технічного університету.

<https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-8726-1881>.

Наукові інтереси:

- механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів;
- технічна експлуатація;
- моделювання технологічних процесів і систем;
- техніко-економічне обґрунтування науково-технічного проекту;
- енергозберігаючі технології обробітку ґрунту.

E-mail: korchak\_nikolay@ukr.net.

**Грушецький** Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії і системотехніки Подільського державного аграрно-технічного університету.

<https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-6434-1213>.

Наукові інтереси:

- удосконалення викопувально-сепаруючих робочих органів коренебульбозбиральних машин;
- експлуатація машин і обладнання;
- технічне обслуговування машин і обладнання;
- інноваційні технології виробництва сільськогосподарської продукції.

E-mail: g.sergiy.1969@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 12.10.2021.