

ДИНАМИКА ИЗНОСА РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПОЧВОЙ

Виктор Аулин, Андрей Тихий

Кировоградский национальный технический университет

Просп. Университетский, 8, Кировоград, Украина

V. Aulin, A. Tihii

Kirovograd national technical University

Ave. University, 8, Kirovograd, Ukraine.

E-mail: Aulin52@mail.ru

Аннотация. В работе исследовали закономерности огибания потоками почвы поверхностей режущих элементов рабочих органов почвообрабатывающих машин на спроектированной установке для исследования закономерностей износа, огибания их потоками и износными характеристиками почвы. Обнаружена зависимость процессов формирования их геометрической формы в процессе взаимодействия с почвой от изменения состояния среды почвы, характера его огибания и скорости относительного движения. Приведены результаты исследования закономерности огибания рабочих органов, заостренных снизу, сверху, с обеих сторон и затупленных, размещенных в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Установлено, что перед затупившимися режущими элементами образуется так называемая "зона застоя" как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях, в которых увеличена концентрация абразивных частиц. Построены схемы характерных зон деформаций почвы при воздействии рабочих органов с образованием уплотненной области. Смоделированы поля скоростей и ускорений в характерных зонах почвы при взаимодействии с режущими элементами. Рассмотрены поля скоростей и ускорений абразивных частиц, а также скорость деформации почвы. Выявлено, что наибольшая интенсивность изменения этих характеристик наблюдается в области поворота пласта почвы.

Установлена связь процесса изнашивания с режущей способностью режущих элементов. По результатам экспериментальных исследований получена зависимость изнашивания и силы резания пласта почвы рабочими органами. Дан анализ процесса изнашивания неупрочненного рабочего органа и изменение его угла заострения γ . Исследовался вариант износа режущего элемента с неодинаковой твердостью и образование профиля с различными углами γ .

Построена стохастическая модель динамики износа рабочих органов в среде почвы. Показано, что под силовым воздействием рабочая поверхность рабочего органа, приспособляясь к условиям взаимодействия с почвой, подлежит избирательному износу, который имеет вероятностную природу и яв-

ляется необратимым диссипативным процессом при снижении плотности приложенной внешней энергии и формировании стабильной формы РЭ.

Ключевые слова: режущий элемент, абразивная частица, напряжение в почве, стохастическая модель, поля скоростей и ускорений, трение, износ, изнашивающая способность.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Анализ методов повышения износостойкости [1,2], показал, что конструкция рабочих органов почвообрабатывающих машин (РОПМ) в ходе эволюции изменилась сравнительно мало и совершенствование, в основном, шло за счет подбора материалов, методов их обработки и улучшения геометрической формы. Вместе с тем работоспособность, особенно РОПМ с режущими элементами (РЭ), остается очень низкой, что сказывается на производительности труда в сельскохозяйственном производстве. Результаты исследований, приведенные в работах [2,3], показывают, что основным средством решения этой проблемы является создание самозатачивающихся РЭ РОПМ, которые обладают следующими преимуществами: технологические операции в течение срока эксплуатации выполняются с одинаковыми достаточно высокими качественными показателями; устраняются простои и потери времени на регулировку и ремонт затупленных РЭ; уменьшаются расходы запасных частей и др. РЭ, в основном, состоит из двух слоев, материалы которых значительно отличаются по износостойкости [4]. Режущий слой, толщина которого устанавливается в зависимости от агротехнических требований, изготавливается из более износостойкого материала, а второй слой - является несущим и изготавливается из относительно мягкого материала, назначение которого оберегать режущий слой от поломок. Вся сложность получения самозатачивающегося РЭ, заключается в необходимости сохранять достаточную остроту его профиля в процессе эксплуатации. Сама же форма профиля двухслойного РЭ при износе, как показали исследования, зависит от соотношения давления почвы на разных участках РЭ, износостойкости материалов слоев, их толщины и изнашива-

щей способности почвы. Выбор минимальной толщины режущей кромки РЭ РОПМ должен быть связан с экономически целесообразными сроками службы РОПМ, а максимальный - с агротехническими требованиями к качеству их работы. РЭ РОПМ имеет лицевую (верхнюю) и тыльную (нижнюю) стороны [5]. В зависимости от варианта расположения износостойкого слоя, процесс износа двухслойного РЭ протекать по-разному.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Вопрос природы и механизма трения и износа деталей и РО СХТ в абразивной среде почвы рассматривали Н.Н. Хрущев, М.А. Бабичев, И.В. Крагельский, Б.И. Костецкий, Д. Гаркунов, В.М. Кашеев, И.А. Икрамов, А. Добровольский, В. М. Ткачев, М.А. Буше, С.Л. Сидоров, И. Мюретти, В.Ф. Лоренц, М.М. Севернев и др. В.Ф. Лоренц [6,7] считал, что под усилием почвы абразивные частицы (АЧ) скользят по рабочей поверхности детали и царапают металл и если их твердость выше твердости основы металла детали, то они внедряются и вытесняют в ней канавки. Из-за неоднородности структуры материала в вытесненном объеме появляются трещины, он становится ослабленным и последующие АЧ продолжают деформировать и легко очищать от него поверхности трения. В.М.Кашеев и Д.М. Гаркунов считают, что общим для различных видов является механический характер разрушения, а следовательно наблюдается АИ. При этом степень закреплённости АЧ играет решающую роль. Вместе с тем изучение факторов, от которых зависит изнашиваемая способность среды почвы, из-за чрезвычайно сложного комплекса возникающих вопросов, недостаточно исследовано. Рассматривая изнашиваемую способность почвы, М.М. Севернев [8,9] обнаружил зависимость ее от прочности АЧ, т.е. способности передавать нагрузки без измельчения. Б.И.Костецкий считал [9], что форма и механизм разрушения при АИ определяются взаимодействием поверхностей трения с АИ, сущность которого заключается в их скольжении, пластическом деформировании металла, внедрении в местах контакта, разрушении поверхностных объемов без отделения металла или снятия микростружки. При этом наблюдаются две четко выраженные формы проявления процессов: механо-химическое разрушение - пластическое деформирование поверхностного слоя (ПС), окисления и последующее разрушение окисных пленок и механическое разрушение ПС - внедрение АЧ и разрушения ПС без отделения частиц основного металла или снятия микростружки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является исследование закономерности огибания потоками почвы поверхностей РЭ РОПМ, следует обеспечить возможности исследования взаимодействия абразивной среды и образцов как в вертикальной так и горизонтальной плоскостях, а для теоретического обоснования взаимодействия РЭ со средой почвы, результаты наблюдений, выделением характерных зон, установить связь

между величиной износа и силой резания РЭ РОПМ, теоретически обосновать избирательный износ РЭ РОПМ и построить стохастическую модель динамики износа.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Формирование геометрической формы РОПМ в процессе взаимодействия с почвой зависит от изменения ее состояния, характера огибания РЭ и скорости относительного движения. Результаты исследования закономерности огибания РЭ РОПМ, заостренных снизу, сверху, с обеих сторон и затупленных, размещенных в вертикальной и горизонтальной плоскостях, приведены на рис. 1. Обнаружено, что при увеличении относительной скорости движения РОПМ от 0,2 м / с до 3 м / с огибающие потоки почвы сверху и снизу разные по интенсивности и отражают степень остроты РЭ. Если РЭ заостренный сверху или снизу, то скорость движения частиц почвы по одной из поверхностей РЭ несколько меньше, чем по другой (рис. 1 а-с, d-f). При заострении РЭ с обеих сторон скорость их огибания потоком почвы в вертикальной (рис. 1 g-i) и в горизонтальной плоскостях (рис. 1 j-l) практически одинакова до наступления затупленного состояния. Контакт частиц среды почвы с поверхностями заостренных РЭ, происходит, в основном, в областях режущей кромки из-за того, что РЭ имеет определенный угол наклона к направлению движения. Это свидетельствует о том, что в данных областях процессы износа более интенсивные, поэтому целесообразно упрочнять эти поверхности.

С изменением геометрической формы профиля и наличии затупления РЭ (рис. 1 b, e, h) интенсивности потоков почвы, огибают его нижнюю и верхнюю поверхности, все еще отличаясь между собой [10]. При появлении затылочной фаски (рис. 1 c, f, i) РЭ выталкивается почвой вверх. Это обусловлено увеличением вертикальной составляющей равнодействующей силы действующей на РОПМ и нарушением устойчивости его движения.

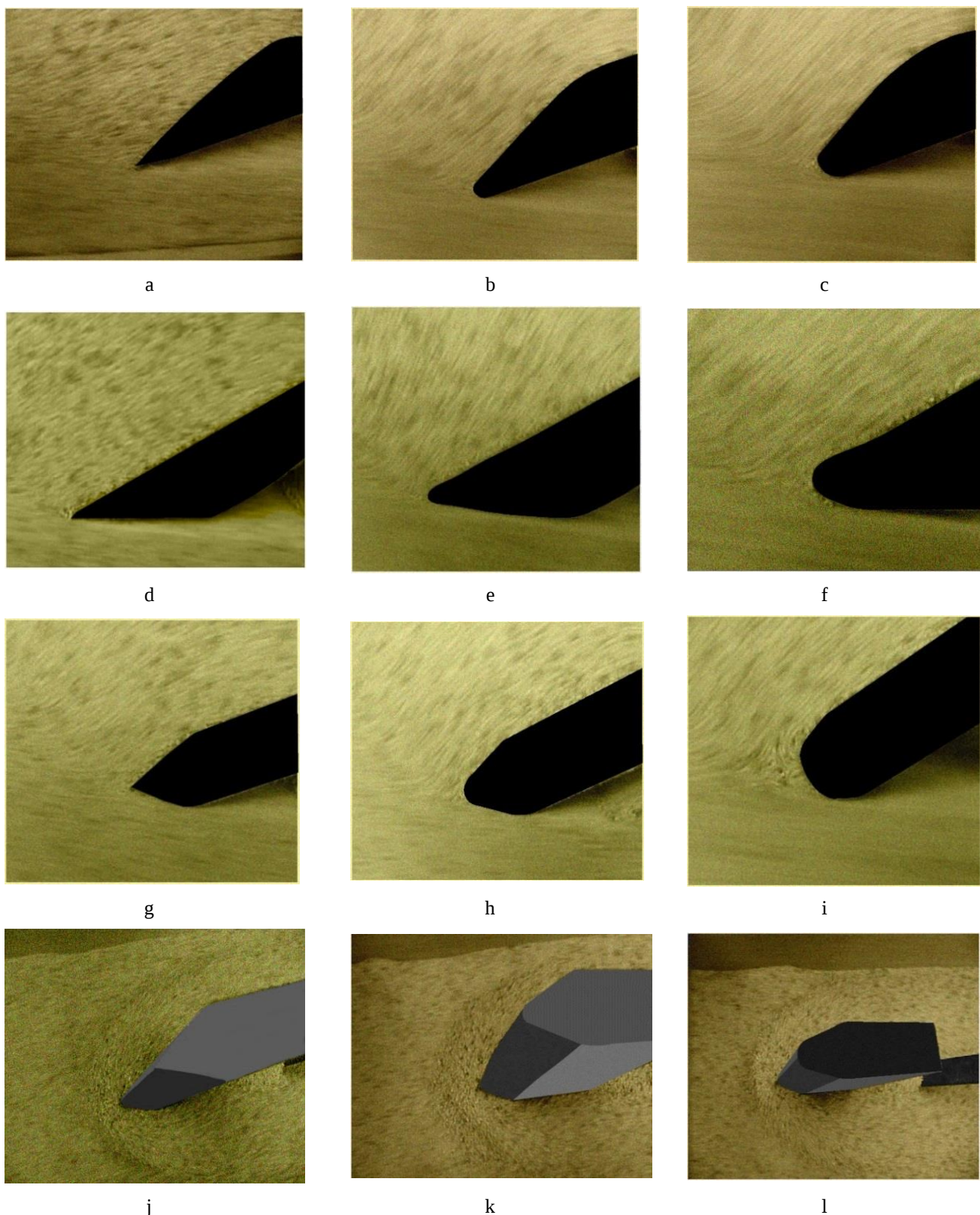


Рис. 1. Фрагменты изменения характера процесса огибания потоками среды почвы РЭ РОПМ, геометрия которых меняется с наработкой от заостренного к затупленному состоянию:

a, b, c - заостренные сверху; d, e, f - заостренные снизу; g, h, i - горизонтальные, заостренные с двух сторон; j, k, l - вертикальные, заостренные с двух сторон

Fig. 1. Fragments of the changing nature of the process medium flows rounding soil CE WPCM, the geometry of which varies with the operating time of the spike to a blunt state:

a, b, c - the pointed top; d, e, f - pointed bottom; g, h, i - horizontal, sharpened on both sides; j, k, l - vertical, pointed on both sides

Кроме этого установлено, что перед затупившимися РЭ образуется, так называемая, "зона застоя" (рис. 1 с, f, i) как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях, в которых увеличена концентрация абразивных частиц (АЧ). Прилегающие к закругленной режущей кромки АЧ осуществляют на нее максимальное силовое воздействие [11]. Наличие "зоны застоя" обуславливает резкое повышение силы сопротивления перемещению РОПМ в почве, т.е. росту тягового сопротивления

Результатом наблюдений за взаимодействием РЭ РОПМ со средней почвы дано теоретическое обоснование. При этом выделяются характерные зоны деформации почвы под воздействием РЭ РОПМ (рис. 2).

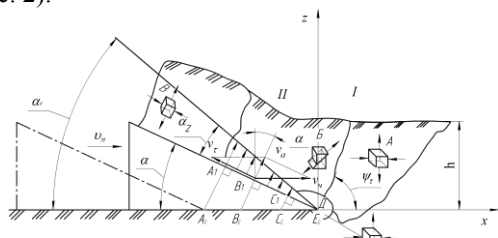


Рис. 2. Схемы характерных зон деформаций почвы при воздействии РЭ РОПМ с образованием уплотненной области

Fig. 2. Schemes specific areas of soil deformation under the influence of CE WPCM to form a densified region

Движение клина РЭ РОПМ со скоростью v_m , углом постановки α и заострения β в почве на глубине h сопровождается перемещением АЧ перпендикулярно рабочей поверхности с абсолютной $v_a = v_m \sin \alpha$ и относительной $v_r = v_m \cos \alpha$ скоростями. При деформации почвы $v_r < v_m$, на клине образуется треугольная плотная зона с углом α_v . Этот процесс продолжается пока суммарный угол $\alpha_{кр} = \alpha + \alpha_z$ не достигнет критического значения: $\alpha_{кр} > 90^\circ - \varphi$, φ - угол трения почвы по клину РЭ. Процесс резания почвы РЭ РОПМ деформированную область условно разделяет на две характерные зоны, в точках которых скорости, ускорения и скорости деформаций изменяются по разным закономерностям (рис.3).

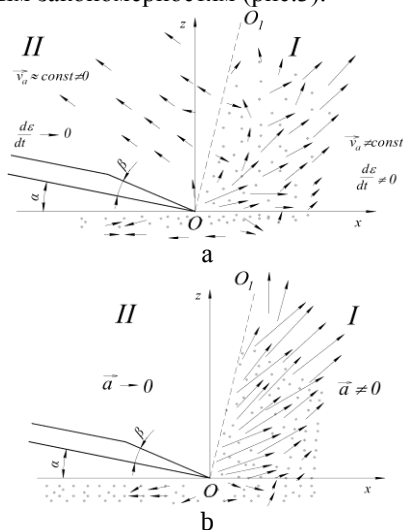


Рис. 3. Поля скоростей (а) и ускорений (б) в характерных зонах почвы при взаимодействии с РЭ РОПМ

Fig. 3. Velocity fields (a) and acceleration (b) in specific zones in interaction with CE WPCM

В первом приближении, в соответствии с экспериментальными результатами, изменение абсолютной скорости точек в зоне I и описывается зависимостью:

$$v_{ax} = v_{a0} \exp(-\alpha_{BT} x_1), \quad (1)$$

где: v_{a0}, v_{ax} - абсолютные скорости АЧ в сечении О-О₁ и на расстоянии x от вершины РЕ; α_{BT} - коэффициент показателя степени, $-\alpha_{BT}$ что является функцией силы внутреннего трения и характера изменения скоростей частиц в этой зоне. Ускорение АЧ и скорость деформации в зоне II также меняются по экспоненциальному закону. Наибольшая интенсивность изменения этих характеристик наблюдается в области поворота пласта почвы. В зоне II - скорость частиц АЧ стабилизируется, а их ускорение и скорость деформации почвы стремится к нулю. Изменение состояния почвы в зонах I и II можно описать уравнениями:

$$E_I \frac{d\sigma}{dx} + \eta_I^{-1} \sigma = K_\sigma \alpha_0 \exp(-\alpha_1 x); \quad (2)$$

$$E_{II}^{-1} \frac{d\sigma}{dx} + \eta_{II}^{-1} \sigma = 0, \quad (3)$$

где: $E_I, E_{II}, \eta_I, \eta_{II}$ - модули упругости и коэффициенты пластичности почвы в зонах I и II; K_σ - коэффициент пропорциональности; α_1 - показатель степени, характеризующий изменение ускорения частиц почвы в зоне I. Учитывая предельные и начальные условия, имеем следующие решения уравнений (2) и (3):

$$\sigma_{x_I} = A \exp(-\alpha_I x_I) + (\sigma_0 - A) \exp(-\beta_I x_I); \quad (4)$$

$$\sigma_{x_{II}} = \sigma_0 \exp(-\beta_{II} x_{II}), \quad (5)$$

где: $\sigma_{x_I}, \sigma_{x_{II}}, \sigma_0$ - напряжение в почве в зонах I, II и сечении О-О₁;

$$A = K_\sigma W_0 \eta_I E_I / (E_I - \alpha_I \eta_I v_I);$$

$$\beta_I = E_I / \eta_I v_I; \quad \beta_{II} = E_{II} / \eta_{II} v_{II}; \quad (6)$$

где: v_I, v_{II} - скорость распространения напряжения в зонах I и II. Зависимости (4) - (6) подтверждают, что максимум напряжений в грунте при его обработке РЭ РОПМ наблюдается в зоне поворота пласта, где наиболее интенсивно меняются кинематические параметры частиц почвы и изнашивается РЭ.

Исходя из экспериментальных исследований, интенсивность изнашивания и сила резания пласта почвы РЭ РОПМ связаны между собой уравнением:

$$u_m / L_{mp} = k_{np} F_p, \quad (7)$$

где: u_m - величина износа; L_{mp} - путь трения; k_{np} - коэффициент пропорциональности. Для определения связи силы резания почвы и износа РЭ рассмот-

рим совокупность сил, действующих на элементы системы "РОПМ-почва" (рис. 4).

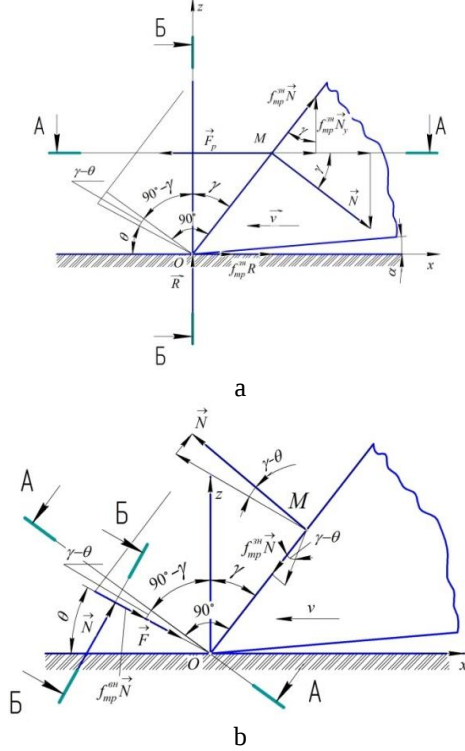


Рис. 4. Совокупность сил в системе, действующих на РЭ РОПМ (а) и пласт почвы (б) сил:

$\vec{N}$ – нормальная сила давления; $f_{mp}^{zn} \vec{N}$ (т. М) – сила внешнего трения; $f_{mp}^{zn} \vec{R}$ (т. О) – приведенная сила трения; $f_{mp}^{вн} \vec{N}$ – сила внутреннего трения; $\vec{F}$ – сила касательного напряжения τ ; $\vec{R}$ (т. О) – реакция почвы; $\vec{F}_p$ (т. М) – сила резания пласта почвы.

Fig. 4. The totality of forces TTC acting on CE WPCM (a) and a layer of soil (b):

$\vec{N}$ – normal pressure force; $f_{mp}^{zn} \vec{N}$ (т. М) – the force of friction; $f_{mp}^{zn} \vec{R}$ (т. О) – reduced friction force; $f_{mp}^{вн} \vec{N}$ – viscous force; $\vec{F}$ – strength of shear stress τ ; $\vec{R}$ (т. О) – reaction of soil; $\vec{F}_p$ (т. М) – soil formation cutting force.

Исходя из условия равновесия РЭ РОПМ, сумма проекций сил на линии А-А и В-В соответственно равны:

$$F_p = N \cos \gamma + f_{mp}^{zn} N \sin \gamma + f_{mp}^{zn} R; \quad (8)$$

$$R = N \sin \gamma - f_{mp}^{zn} N \cos \gamma. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8), получаем:

$$F_p = N \left((1 - f_{mp}^{zn^2}) \cos \gamma + 2 f_{mp}^{zn} N \sin \gamma \right). \quad (10)$$

В совокупности сил, действующих на пласт почвы (рис. 4 б), направление нормальной силы $\vec{N}$ совпадает с линией С-С, перпендикулярной плоскости среза, которая образует угол θ с направлением движения РОПМ и угол $(\gamma - \theta)$ с линией DD, что перпендикулярна поверхности РЕ, заостренного под уг-

лом γ . С учетом условия равновесия проекции сил на линии С-С и D-D равны:

$$N = f_{mp}^{zn} N \cos(\gamma - \theta) - N \sin(\gamma - \theta); \quad (11)$$

$$f_{mp}^{вн} N = f_{mp}^{zn} f_{mp}^{вн} N \cos(\gamma - \theta) - f_{mp}^{вн} N \sin(\gamma - \theta). \quad (12)$$

В плоскости среза сила F касательного напряжения τ равна:

$$\vec{F}_\tau = a_n b_n \tau / \sin \theta, \quad (13)$$

где: a_n , b_n – толщина и ширина срезаемого слоя (пласта) почвы.

Проектируя силы, действующие в системе "РОПМ-грунт" в зоне резания, на линию плоскости крошения почвы и учитывая условие равновесия, имеем:

$$F = N \cos(\gamma - \theta) + f_{mp}^{zn} N \sin(\gamma - \theta) - f_{mp}^{zn} f_{mp}^{вн} N \cos(\gamma - \theta) + f_{mp}^{вн} N \sin(\gamma - \theta). \quad (14)$$

Сравнивая правые части уравнений (13) и (14), получим:

$$N = \frac{a_n b_n \tau}{[(1 - f_{mp}^{zn} f_{mp}^{вн}) \cos(\gamma - \theta) + (f_{mp}^{zn} + f_{mp}^{вн}) \sin(\gamma - \theta)] \sin \theta} \quad (15)$$

Подставляя формулу (15) в уравнение (10), имеем:

$$F_p = \frac{a_n b_n \tau [(1 - f_{mp}^{zn^2}) \cos \gamma + 2 f_{mp}^{zn} \sin \gamma]}{\sin \theta [(1 - f_{mp}^{zn} f_{mp}^{вн}) \cos(\gamma - \theta) + (f_{mp}^{zn} + f_{mp}^{вн}) \sin(\gamma - \theta)]} \quad (16)$$

Учитывая (16) в уравнении (7), величина износа РЕ РОМ составляет:

$$u_m = \frac{k_{np} a_n b_n \tau [(1 - f_{mp}^{zn^2}) \cos \gamma + 2 f_{mp}^{zn} \sin \gamma] L_{mp}}{\sin \theta [(1 - f_{mp}^{zn} f_{mp}^{вн}) \cos(\gamma - \theta) + (f_{mp}^{zn} + f_{mp}^{вн}) \sin(\gamma - \theta)]} \quad (17)$$

По результатам экспериментальных исследований выявлено, что в процессе износа неупрочненного РЭ РОПМ угол γ с наработкой уменьшается [12,13], а сила резания соответственно увеличивается, а на упрочненных – этот угол и сила резания практически не меняются. При износе РЭ с неодинаковой твердостью образуется профиль с различными углами γ . При этом суммарная сила резания почвенного пласта, мощность и тяговое сопротивление РОПМ уменьшаются.

С теоретической точки зрения динамика износа РОПМ в почве окончательно не раскрыта, особенно с РЭ. Под силовым воздействием рабочая поверхность РОПМ, приспособляясь к условиям взаимодействия с грунтом, подлежит ИИ, который имеет вероятностную природу и является необратимым диссипативным процессом при снижении плотности приложенной внешней энергии [14,15] и формировании стабильной формы РЭ. При этом процесс износа описывается стохастическим дифференциальным уравнением [16]:

$$dU(t) = \phi[U(t), t] dt + \psi[U(t), t] dw(t), \quad (18)$$

где: $U(t)$ – функция относительного износа:

$$U(t) = u(t)/u_{zp} \quad U(t) = u(t)/u_{zp},$$

где: $u(t)$, u_{zp} – поточный и граничный износ; $\phi[U(t), t]$, $\psi[U(t), t]$ – детерминированные функции, характеризующие интенсивность износа; $w(t)$ – функция случайной составляющей, как винеровский процесс [154]. Для случайных величин $w(t_1/t_{zp})$ и

$w(t_2/t_{cp})$ при $t_1/t_{cp} \neq t_2/t_{cp}$, $t_1/t_{cp}, t_2/t_{cp} \in [0; T]$, $T = t/t_{cp}$, функция $U(t)$ описывает износ как непрерывный марковский процесс [17,18]. При этом характер процесса полностью определяется плотностью условной вероятности $\omega(U, t/t_{cp})$ [346] и удовлетворяет обобщенное интегральное уравнение Маркова, которое сводится к уравнению Колмогорова-Фоккера-Планка [342]:

$$\frac{\partial \omega(U, t)}{\partial t} = \frac{\partial [v(U, t)\omega(U, t)]}{\partial U} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 [c(U, t)\omega(U, t)]}{\partial U^2}, \quad (19)$$

где: $v(U, t)$, $c(U, t)$ – функциональные коэффициенты, описывающие среднюю скорость износа и скорость изменения условной дисперсии процесса. Учитывая уравнения (18), уравнение (19) принимает вид [19]:

$$\frac{\partial \omega(U, t)}{\partial t} = \frac{\partial [\phi(U(t), t)\omega(U, t)]}{\partial U} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 [\psi(U(t), t)^2 \omega(U, t)]}{\partial U^2}. \quad (20)$$

Поскольку, износостойкость РОПМ определяется величиной износа, то целесообразно использовать закон его распределения с математическим ожиданием и дисперсией [452]:

$$M[\Delta u(t_2, t_1)] = M[u(t_2)] - M[u(t_1)];$$

$$D[\Delta u(t_2, t_1)] = D[u(t_2)] + D[u(t_1)]. \quad (21)$$

При этом коэффициенты $\phi(U(t), t)$ и $\psi[U(t), t]$ уравнений (18) и (20), для условного предельного износа Δu_{cp} , равны:

$$\phi(U(t), t) = \frac{M[u(t_2)] - M[u(t_1)]}{(t_2 - t_1)(\Delta u_{cp})};$$

$$\psi[U(t), t] = \sqrt{\frac{D[u(t_2)] - D[u(t_1)]}{(t_2 - t_1)(\Delta u_{cp})^2}}. \quad (22)$$

Если уравнение кинетики изнашивания имеет вид:

$$dU(t) = D_u dt + S_u d\omega(t), \quad (23)$$

где: D_u и S_u коэффициенты, характеризующие интенсивность детерминированной и случайной составляющих износа:

$$D_u = \frac{M[u(t_2, t_1)]}{(t_2 - t_1)(\Delta u_{cp})},$$

$$S_u = \sqrt{\frac{D[u(t_2, t_1)]}{\Delta u_{cp} \sqrt{t_2 - t_1}}}, \quad (24)$$

то частичное решение уравнения (20) следующее:

$$U(t) = U_0 + \int_0^{t/t_{cp}} D_u d\tau + \int_0^{t/t_{cp}} S_u d\omega(\tau) = U_0 + D_u t/t_{cp} + \int_0^{t/t_{cp}} d\omega(\tau), \quad (25)$$

где: $U_0 = U(0)$ – начальное условие, а $w(t/t_{cp})$ – подается через нормальное распределение случайной величины $\zeta(t/t_{cp})$ с нулевым математическим ожиданием является единичной дисперсией:

$$w(t/t_{cp}) = \zeta(t/t_{cp}) \sqrt{t/t_{cp}};$$

$$dw(t/t_{cp}) = \zeta(t/t_{cp}) \sqrt{dt/t_{cp}}. \quad (26)$$

Используя подход, разработанный академиком В.О. Котельниковым и А.И. Јегі, действия дискретной случайной величины $\zeta(t/t_{cp})$ можно визуализи-

ровать отображением в виде L отсчетов

$$\zeta_j = \zeta(\tau_j) \text{ при } \tau_1 = T/L \text{ и } \tau_L = T, \quad (27)$$

то уравнение (25) принимает вид:

$$U(\tau_j) = U_0 + D_u \tau_j + \sqrt{\frac{T}{L}} S_u \sum_{i=1}^j \zeta_i \text{ для } j = \overline{1, L}. \quad (28)$$

Учитывая (24) в уравнении (28), имеем:

$$U(\tau_j) = U_0 + \frac{M[\Delta u(t_2, t_1)]}{(t_2 - t_1)(\Delta u_{cp})} \tau_j + \frac{\sqrt{D[\Delta u(t_2, t_1)]T}}{\Delta u_{cp} \sqrt{L(t_2 - t_1)}} \sum_{i=1}^j \zeta_i. \quad (29)$$

Учитывая поле износа локальных областей РОПМ и функцию (29), на ПК вычисляют отсчеты и визуализируют случайный процесс (25) в виде графического отображения нормированного износа от нормированного времени T_N .

Указанный метод отображения использовали для изучения износа серийных и упрочненных стрельчатых и односторонних лап культиваторов [20, 21]. Для серийных стрельчатых лап имеем следующее уравнение:

$$U(t) = U_0 + \int_0^{t/t_{cp}} D_u(\tau) d\tau + \int_0^{t/t_{cp}} S_u d\omega(\tau), \quad (30)$$

$$= U_0 + \int_0^{t/t_{cp}} D_u(\tau) d\tau + S_u \int_0^{t/t_{cp}} d\omega(\tau)$$

которое в форме отсчетов имеет вид:

$$U(\tau_j) = U_0 + \frac{T}{L} \sum_{i=1}^j D_u(\tau_i) + \sqrt{\frac{T}{L}} S_u \sum_{i=1}^j \zeta_i \text{ для } j = \overline{1, L}. \quad (31)$$

При этом детерминированная составляющая износа равна:

$$M[U(t/t_{cp})] = U_0 + \alpha(t/t_{cp})^\beta; \quad \alpha \in (0; 1), \beta \in (0; 1) \quad (32)$$

Отображение случайного процесса с отсчетом осуществляли по параметрам: T , U_0 , α , β , S_u , L (рис. 5, а).

Для упрочненных стрельчатых лап, с использованием поля ИИ и условий реализации эффекта самозатачивание, детерминированная составляющая износа равна:

$$M[U(t/t_{cp})] = \begin{cases} U_0 + \alpha t/t_{cp}, & t/t_{cp} \in [0; t_{c1}/t_{cp}], \\ U_0 + \alpha t^2/t_{cp}^2 + bt/t_{cp} + c, & t/t_{cp} \in [t_{c1}/t_{cp}; T]. \end{cases} \quad (33)$$

Поскольку при условии $t/t_{cp} = t_{c1}/t_{cp}$ износ является непрерывным процессом, то сравнивая составляющие (33), имеем:

$$U_0 + \alpha t_{c1}/t_{cp} = U_0 + \alpha t_{c1}^2/t_{cp}^2 + bt_{c1}/t_{cp} + c. \quad (34)$$

$$\text{Откуда } \alpha = \frac{\alpha t_{c1}^2/t_{cp}^2 + bt_{c1}/t_{cp} + c}{t_{c1}/t_{cp}}. \quad (35)$$

Учитывая (35) в (33) получим:

$$M[U(t/t_{cp})] = \begin{cases} U_0 + \frac{\alpha t_{c1}^2/t_{cp}^2 + bt_{c1}/t_{cp} + c}{t_{c1}} t/t_{cp}, & t/t_{cp} \in [0; t_{c1}/t_{cp}], \\ U_0 + \alpha t^2/t_{cp}^2 + bt/t_{cp} + c, & t/t_{cp} \in [t_{c1}/t_{cp}; T]. \end{cases} \quad (36)$$

По аналогии к случаю (32) процедурой отображения случайного процесса ИИ упрочненной стрельчатой лапы культиватора осуществляли с помощью параметров: T , U_0 , t_{c1} , U_{c1} , t_{c2} , U_{c2} , S_u , L (рис. 5, б).

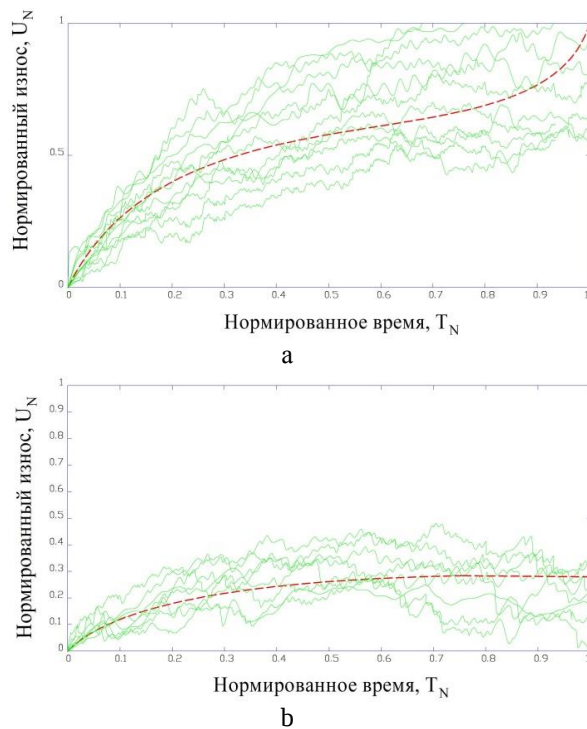


Рис. 5. Отображение случайных процессов серийных (а) – $S_u = 0,25$, $\alpha = 1,05$, $S_u = 0,25$, $\beta = 0,35$ и упрочнение стрелчатых лап культиватора (б) – $t_{c1}/t_{zp} = 0,8$, $U_{c1} = 0,2$, $t_{c2}/t_{zp} = 0,85$, $U_{c2} = 0,27$, $S_u = 0,25$ за их отсчетами на промежутке наблюдения $T_N = 1$ за 14 реализаций длиной $L = 1000$ случайной величины $\zeta(t)$, при $U_0 = 0$

Fig. 5. Showing random processes serial (a) – $S_u = 0,25$, $\alpha = 1,05$, $S_u = 0,25$, $\beta = 0,35$ and hardening of the lancet cultivator (б) – $t_{c1}/t_{zp} = 0,8$, $U_{c1} = 0,2$, $t_{c2}/t_{zp} = 0,85$, $U_{c2} = 0,27$, $S_u = 0,25$ their samples in the interval of observation $T_N = 1$ for 14 length $L = 1000$ random variable $\zeta(t)$, at $U_0 = 0$

Можно видеть, что прямолинейный участок отображения (рис. 5, б) соответствует сложившейся минимальной интенсивности износа (самоорганизации), а отражение (рис. 5, а) – нарастающему избирательному износу.

ВЫВОДЫ

1. Исследованы закономерности огибания потоками почвы поверхностей режущих элементов рабочих органов почвообрабатывающих машин. Наблюдается зависимость формирования геометрической формы РОПМ в процессе трения и износа от изменения состояния среды почвы, характера его огибания и скорости относительного движения. Приведены результаты исследования закономерности огибания РЭ РОПМ, заостренных снизу, сверху, с обеих сторон и затупленных, размещенных в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

2. Установлено, что перед затупившимися РЭ образуется так называемая "зона застоя" как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях, в которых увеличена концентрация абразивных частиц.

Построены схемы характерных зон деформаций почвы при воздействии РЭ РОПМ с образованием уплотненной области.

3. Получены модели поля скоростей, ускорений, напряжений и деформаций в точках характерных зон почвы при взаимодействии с РЭ РОПМ. Выявлено, что наибольшая интенсивность изменения этих характеристик наблюдается в области поворота пласта почвы.

4. Исследовано связь процесса изнашивания с режущей способностью РЭ РОПМ. Получена зависимость связи износа с силой резания пласта почвы РЭ РОПМ.

5. По результатам экспериментальных исследований анализируется процесс износа неупрочненного РЭ РОПМ и изменение угла заострения. Исследован вариант износа РЭ с неодинаковой твердостью и образование профиля с различными углами заострения.

6. Построена стохастическая модель динамики износа РОПМ в среде почвы. Показано, что под силовым воздействием рабочая поверхность РОПМ, приспосабливаясь к условиям взаимодействия с почвой, подлжет избирательному износу, который имеет вероятностную природу и является необратимым диссипативным процессом при снижении плотности приложенной внешней энергии и формировании стабильной формы РЭ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аулин В.В. 2014. Физические основы процессов и состояний самоорганизации в триботехнических системах: монография. Кировоград: Изд. Лисенко В.Ф., 370. (Украина)
2. Подкатилов К.Е. 1969. Динамические исследования рабочих органов культиваторов повышенной прочности и износостойкости с нижним и верхним упрочнением твердыми сплавами. автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 21.
3. Бернштейн Д.Б. 1985. Оценка возможности самозатачивания почворезущих элементов при абразивном изнашивании. Тракторы и сельхозмашины. №6. 15-19.
4. V. Aulin, T. Zamota 2013. Selective wear of cuttings elements of working organs of tillage machines with realization of self-sharpening effect. TEKA, Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Lublin-Rzesow, V. 13, N4, 9-17. (Poland)
5. Аулин В.В., Карпушин С.А., Тихий А.А. 2012. Самозатачивание режущих элементов почвообрабатывающих и землеройных машин в условиях упрочнения их рабочих поверхностей. Сб. научн. трудов "Вестник ХНАДУ". Харьков: вып. 57. 188-194 (Украина).
6. Аулин В.В., Тихий А.А. 2013. Влияние изменения состояния и свойств почвы на износ рабочих органов, работающих на разной глубине. Проблемы трибологии (Problems of tribology). Хмельницкий: ХНУ, №1.120-126 (Украина).
7. Аулін В.В. 2013. Состояние самоорганизации среды почвы и закономерности износа рабочих органов почвообрабатывающих машин. Проблемы трибологии

(Problems of tribology). Хмельницкий: ХНУ, №1.114-119 (Украина).

8. Аулин В.В. 2013. Характеристика почвы как элемента трибосистемы "РОПМ-почва" и реологическое обоснование ее взаимодействия с РОПМ. Вестник инженер. академии Украины. №1. 104-109 (Украина).

9. Севернев, Н. Н., Подлекарев Н. Н., Сохадзе В. Ш., Китиков В. О. 2011. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин; под ред. Н. Н. Севернева. Минск: наука, 333 (Беларус).

10. Новиков В.С. 2009. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин: автореф. дисс. на соискание ученой степени д-ра. техн. наук: спец. 05.20.03 – технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. М., 38.

11. Баранов В.В. 1985. Оптимизационные методы последовательных приближений в марковских процессах решение. Кибернетика. №4. 103-111

12. Бернштейн Д.Б. 2002. Абразивное изнашивание лемешного лезвия и работоспособность плуга. Тракторы и сельхозмашины. № 6.40-45.

13. Капов С.П., Мударисов С.Г. 2005. Основные принципы построения модели разрушения почвенной среды. Тракторы и сельскохозяй. машины. №6. 30-32 (Россия)

14. Аулин В.В., Бобрицкий В.М., Тихий А.А. 2013. Обеспечение самоорганизации формы деталей с режущими элементами при их изготовлении. Проблемы трибологии (Problems of tribology). Хмельницкий: ХНУ, №3. 104-108 (Украина).

15. Аулин В.В., Тихий А.А. Д.п. № 69735 Украина, МПК (2012) G01N 3/56. Установка для исследования взаимодействия абразивной среды с рабочими органами почвообрабатывающих машин. u201112831; заявл. 01.11.2011; опубл. 10.05.2012. Бюл №9.

16. Аулин В.В., Настоящий В.А., Тихий А.А. 2014. Избирательный износ рабочих органов почвообрабатывающих и землеройных машин как отображение стохастической природы их взаимодействия с частицами почвы. Сб. науч. трудов Укр. гос. академии железн. транспорту. Вып. 148. 25-33. (Украина)

17. Аулин В.В., Бобрицкий В.М. 2007. Стохастическая модель динамики процесса абразивного изнашивания режущих элементов рабочих органов почвообрабатывающих машин. Сб. науч. Труд. ЛНАУ. Серия: Техн. науки. Луганск: ЛНАУ, , №76(99). 15-18 (Украина)

18. Баранов В.В. 1981. Рекуррентные методы оптимальных решений в стохастических системах. Харьков: Виш. Школа. 145 (Украина)

19. Аулин В.В., Бобрицкий В.Н., Тихий А.А. 2010. Повышение долговечности РОПМ, упрочнением их за разными вариантами и реализацией эффекта самозатачивания. Вестник ХНТУСГ /Проблемы надежности машин и средств механизации сельхоз. произв. Харьков. №100.158-165 (Украина).

20. Королюк В.С. Турбин А.Ф. 1982 Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем: Монография. Киев: Наук. думка., 236. (Украина)

21. Костецкий Б.И., Стрельников В.П., Тацкий В.Г. 1976. Марковская модель износа и прогнозирования долговечности изнашиваемых деталей. Проблемы трения и изнашивания. вып. 10. 10-15.

WEAR PERFORMANCE OF CUTTING ELEMENTS OF THE OPERATIVE PARTS OF TILLAGE MACHINES IN CONTACT WITH SOIL

Summary. In the work the principles of diffraction flows soil surfaces of cutting elements of the operative parts of tillage machines on an apparatus which were designed for study of the regularities of wear are investigated. The dependence of formation processes of their geometric shape in the confuction process with soil from changing of soil environment state, the nature of diffraction and the speed of relative movement is detected. The results of investigations of diffraction patterns of operative parts pointed from below, from above, from both sides and blunted; placed in vertical and horizontal planes. It is established that blunt in front of the cutting elements form the so-called "zone of stasis" both in vertical and in horizontal planes, in which the increased concentration of abrasive particles. The schemes in characteristic zones of soil deformation at impact of operative parts with the formation of the compacted area are constructed. The velocity fields and acceleration in the characteristic zones of soil when interacting with the cutting elements are simulated. The velocity fields and acceleration of abrasive particles, and the rate of deformation of the soil are considered. It is revealed that the highest intensity of changes in these characteristics is observed in the region of twist of a layer of the soil.

The relationship of the process of wear with the cutting ability of the cutting elements is ascertained. According to the results of experimental studies the dependence of wear rate and cutting forces of a layer of soil working bodies is acquised. The analysis of the process of soft wear of the operative parts and changing its angle of taper γ is given. Studied variant of the wear of the cutting element with different hardness and the formation of profile with different angles γ .

A stochastic model for the dynamics of wear of the operative parts in the soil environment is built. It is shown that under the power action of the working surface of the operative parts, adapting to the conditions of interaction with the soil is subject to selective wear, which has a probabilistic nature and is irreversible dissipative process by reducing the density of externally applied energy and the formation of a stable form of the cutting element.

Key words: cutting element, the abrasive particle stress in the soil, a stochastic model, velocity field and acceleration, friction, wear, wear ability.