

ОБОСНОВАНИЕ ФОРМЫ КРИВОЛИНЕЙНОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА ДЛЯ ПОСЛОЙНОЙ БЕЗОТВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

THE RATIONALE FOR THE CURVILINEAR SHAPE OF THE WORKING BODY FOR LAYERED SUBSURFACE TILLAGE

Г.Г. ПАРХОМЕНКО, к.т.н.

И.В. БОЖКО, к.т.н.

А.В. ГРОМАКОВ

ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Зерноград, Россия, i.v.bozhko@mail.ru

G.G. PARKHOMENKO, PhD in Engineering

I.V. BOZHKO, PhD in Engineering

A.V. GROMAKOV

The Federal State Budget Scientific Institution «Agrarian Science Center «Donskoy», Zernograd, Russia, i.v.bozhko@mail.ru

Чем большую площадь поперечного сечения пласта можно обработать за один проход, тем меньше необходимо затратить энергии на осуществление технологического процесса. Площадь поперечного сечения обрабатываемого пласта определяется периметром рабочего органа. Круг из всех фигур равного периметра имеет наибольшую площадь. Рабочий орган целесообразно выполнить кольцевым. При проектировании кольца на плоскость наименьшей силы резания образуется эллипс. С точки зрения физической математики эллипс является наилучшей кривой, обладающей свойством минимума. Оптимальная форма рабочего органа – эллиптическое кольцо. Параметр эллипса соответствует углу сдвига почвы в продольно-вертикальной плоскости. Эллиптический рабочий орган осуществляет крошение и сепарацию слоя с вынесением на поверхность более прочных макроагрегатов почвы и просыпанием в щели между ними эрозионно-опасных частиц, которые остаются внутри пласта. Напряжения на рабочий орган определяются при взаимодействии с почвой. На основании эллипса действует нормальное напряжение, обусловленное подпором пласта почвы, а на цилиндрические поверхности оказывается давление режущих кромок рабочего органа. Интенсивность возникающих на поверхности цилиндра напряжений определяются на внутренней трещине эллиптической формы, расположенной в сплошном теле под действием нагрузки. Наибольшая интенсивность напряжений локализована на концах малой оси эллипса, а наименьшая – на концах большой оси. С увеличением угла крошения интенсивность напряжений увеличивается, а далее снижается. При эллиптической форме рабочего органа зона интенсивности напряжений шире, чем у круглой режущей кромки, при этом в области боковых закруглений создаются деформации растяжения и изгиба, что отсутствует у плоскореза, тяговое сопротивление снижается на 0,5...1,3 кН. Степень крошения эллиптических рабочих органов 87,1...98,5 % фракций до 50 мм, гребнистость 1...2 см, уменьшение эрозионно-опасных частиц 15...22 %.

Ключевые слова: криволинейный рабочий орган для безотвальной обработки почвы, площадь поперечного сечения, физическая математика, эллипс.

The larger the cross-sectional area of the formation can be processed in a single pass, the less energy is needed to carry out the process. The cross-sectional area of the treated formation is determined by the perimeter of the working body. The circle of all figures of equal perimeter has the largest area. It is advisable to make the working organ ring-shaped. When designing a ring on the plane of the smallest cutting force, an ellipse is formed. From the point of view of physical mathematics, the ellipse is the best curve possessing the minimum property. The optimal shape of the working body is an elliptical ring. The parameter of the ellipse corresponds to the angle of soil displacement in the longitudinal-vertical plane. The elliptical working body carries out the crumbling and separation of the layer with the removal of more solid macroaggregates of soil on the surface and the erosion-hazardous particles that remain inside the formation in the gap between them. Stresses on the working body are determined by interaction with the soil. On the base of the ellipse, the normal stress caused by the backing of the soil layer acts, and the pressure of the cutting edges of the working body affects the cylindrical surfaces. The intensity of stresses arising on the surface of the cylinder is determined on the internal crack of an elliptical shape located in a solid body under the action of a load. The greatest intensity of stresses is localized at the ends of the minor axis of the ellipse, and the smallest at the ends of the major axis. As the cracking angle increases, the stress intensity increases, and then decreases. With an elliptical shape of the working element, the stress intensity zone is wider than that of the circular cutting edge, while deformation of stretching and bending is created in the zone of lateral rounding, which is absent in the plane, and the traction resistance is reduced by 0,5 ... 1,3 kN. The degree of crumbling of elliptical working organs is 87,1 ... 98,5 % of fractions up to 50 mm, combing 1 ... 2 cm, reduction of erosion-hazardous particles 15...22 %.

Keywords: curvilinear working body for soil-free tillage, cross-sectional area, physical mathematics, ellipse.

Введение

Почва представляет собой полудисперсную и гетерогенную среду, состоящую из твердой, жидкой и газообразной фаз. Твердая фаза представлена механическими агрегатами различной величины, совокупная площадь которых определяет удельную поверхность почвы. Из физики земледелия известно, что для коллоидной системы (почва), состоящей из дисперсной фазы (твердой) и дисперсной среды (жидкость), в соответствии с принципом минимума свободной энергии характерно постоянное уменьшение удельной поверхности почвы за счет более плотной укладки агрегатов. Для увеличения удельной поверхности необходимо совершить определенную работу, которая получает выражение в энергии на обработку почвы, пропорциональной совокупной площади механических агрегатов твердой фазы. Энергия на обработку почвы зависит от площади проекции на плоскость механических агрегатов, составляющую часть от их поверхности (25 %...50 %, согласно допуску при визуальном методе определения). Поэтому чем большую площадь поперечного сечения пласта можно обработать за один проход, тем меньше необходимо затратить энергии на осуществление технологического процесса в целом [1, 2].

Цель исследования

Целью исследования является снижение затрат энергии на обработку почвы при сохранении ее качества за счет оптимизации формы рабочего органа.

Материалы и методы

Применялись методы сравнения и монографического обследования различных конструкций рабочих органов. Исследование основано на положениях теоретической механики и физической математики.

Результаты исследования и их обсуждение

Площадь поперечного сечения обрабатываемого пласта определяется периметром (длиной геометрических поверхностей) рабочего органа. Размеры разрабатываемого рабочего органа ограничены, с одной стороны, его шириной захвата, а с другой – требуемой глубиной обработки поверхностного слоя почвы, поэтому его периметр не может быть увеличен.

Помимо этого при увеличении периметра возрастает металлоемкость рабочего органа, что нежелательно. Поэтому при ограниченном периметре рабочего органа необходимо обработать наибольшую площадь поперечного сечения пласта.

Согласно изопериметрической теореме [3], круг из всех фигур равного периметра имеет наибольшую площадь. Поэтому рабочий орган с ограниченным периметром геометрических поверхностей должен вырезать и обрабатывать почву пласта с поперечным сечением в виде круга, т.е. иметь форму кольца.

Согласно теории прочности Мора, разрушение пласта происходит в плоскости, расположенной под углом ε_g к дну борозды, где создается напряжение, равное чистому сдвигу. При этом величина угла сдвига устанавливается такой, при которой сила резания будет минимальной.

При проектировании кольца в форме окружности на плоскость сдвига диаметр, параллельный этой плоскости, отражается в натуральную величину, а все хорды, перпендикулярные к диаметру, уменьшаются на величину $\cos \varepsilon_g$ (ε_g – угол сдвига почвы в продольно-вертикальной плоскости), образуя эллипс с большой полуосью R с коэффициентом сжатия:

$$k_{\text{сж}} = R \cos \varepsilon_g. \quad (1)$$

Коэффициент сжатия эллипса:

$$k_{\text{сж}} = \frac{r}{R}, \quad (2)$$

где r – малая полуось эллипса; R – большая полуось эллипса.

Из выражения (2) с учетом (1) получим:

$$r = R \cos \varepsilon_g.$$

Таким образом, для уменьшения силы резания пласта целесообразно представить разрабатываемый рабочий орган в виде кольца с формой эллипса, образованного равным сжатием окружности, с параметром, соответствующим углу сдвига почвы в продольно-вертикальной плоскости.

Параметр ε_g рабочего органа можно определить по формуле:

$$\varepsilon_g = \frac{\pi - (\beta + \varphi + \rho)}{2},$$

где β – угол крошения (установки режущей грани); φ – угол внешнего трения рабочего органа о почву; ρ – угол внутреннего трения почвы о почву.

В случае отклонения эллипса от вертикального положения длина малой оси равна:

$$2r' = \frac{2r}{\cos \alpha_3},$$

где α_3 – угол отклонения малой оси эллипса от вертикали.

Помимо этого, отклонение малой оси эллипса от вертикального положения даст возможность некоторого его выноса вперед относительно стойки режущей кромки рабочего органа [4].

С точки зрения физической математики, эллипс является наилучшей кривой, обладающей свойством *min*. Если рассмотреть две точки (*A* и *B*) в поперечно-вертикальной плоскости, определяющие *min* ширину захвата (*b*) разработанного рабочего органа, лежащие на поверхности поля, предполагаемого топографически гладким на макроуровне, и горизонтальную прямую *X*, ограничивающую глубину обработки (*a*), можно на данной прямой отыскать такую точку (*X'*), чтобы сумма $AX' + BX'$, была постоянно наименьшей, т.е. $AX' + BX' = \min = \text{const}$ (рис. 1).

В физической математике подобная задача рассматривается с помощью линий уровня; придается степень подвижности точке *X'*, перемещающейся свободно в поперечно-вертикальной плоскости при соблюдении приведенного выше условия. Решением данной задачи является траектория движения точки *X'* в виде эллипса с фокусами в точках *A* и *B*. Искомый *min* образуется при пересечении эллипса с прямой *X* (рис. 1).

Данное решение не противоречит самому определению эллипса, который представля-

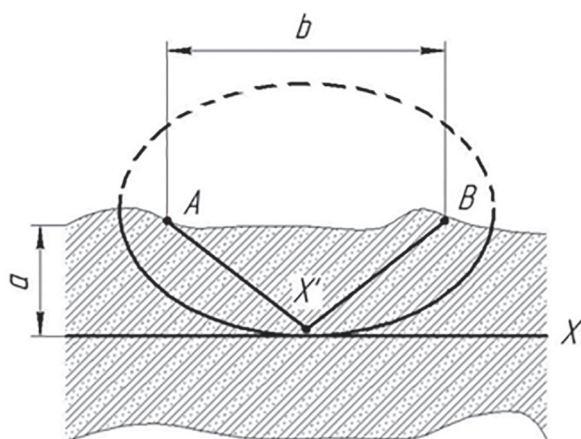


Рис. 1. Эллипс с точки зрения физической математики

ет собой геометрическое место точек, сумма расстояний которых до двух данных точек *A* и *B* имеет одно и то же значение, т.е. *const*. *AB* – фокусное расстояние, представляет собой *min* ширину захвата рабочего органа. Линии уровня – это конфокальные эллипсы, т.е. с одними и теми же фокусами (*A* и *B*).

Таким образом, наилучшей кривой, обладающей свойством *min* в данных условиях, является эллипс. В связи с этим, придав рабочему органу форму эллипса, мы обеспечиваем обработку пласта почвы от поверхности поля до заданной глубины с высокой степенью крошения и *min* затратами энергии [5, 6].

Известно свойство эллипса о сходимости лучей после отражения из одного фокуса в другой, что по аналогии можно применить к обработке почвы. Так, поток почвы при движении агрегата, отталкиваясь при соударении о поверхность рабочего органа, перемещается из одного фокуса эллипса в другой. При этом наблюдаются дополнительное крошение и некоторая сепарация слоя с вынесением на поверхность более прочных макроагрегатов почвы и просыпанием в щели между ними эрозионно-опасных частиц, которые остаются внутри пласта.

Среда, которую обрабатывает рабочий орган, накладывает на его движение геометрические и кинематические ограничения. Неравномерность среды по физико-механическим свойствам, а также неровность поверхности поля, по которому движется почвообрабатывающий агрегат, обуславливают нестационарность связей, накладываемых на систему «пласт почвы – рабочий орган». Кроме того, система характеризуется нелинейными силами сопротивления, действующими со стороны обрабатываемой среды.

Сопротивления почвы, действующие на рабочий орган, можно определить при моделировании процессов их взаимодействия с использованием теории предельного состояния сплошной среды, рассматривающей напряжения, при которых изменения сил приводит к потере равновесия и разрушению пласта.

При этом рассматриваются процессы, происходящие при постоянной скорости почвообрабатывающего агрегата, на который не оказывают влияния явления, происходящие в моменты начала и завершения движения. Подобно равновесию потока в трубе, рассматриваемому в механике жидкостей и газов, можно

исследовать взаимодействие рабочего органа с пластом почвы. Поток в заданной системе координат считается установившемся, а режим стационарным, если во всякой его точке вектор скорости не изменяется во времени. Замена действительной скорости на среднюю позволяет применить концепцию установившегося состояния к требуемому потоку.

Поскольку разрушенный пласт является структурным, в отличие от турбулентного потока жидкости, вводится допущение о периодичности процесса обработки почвы при взаимодействии с рабочим органом и о случайном характере отклонений.

При условии однородности распределения напряжений данный подход может применяться и для почвы, что позволяет осуществлять исследования рабочих органов, приводящих в процессе функционирования к изменению геометрии пласта под действием нагрузки.

С учетом вышеизложенного рассмотрим напряженное состояние однородного пласта при взаимодействии с рабочим органом. Для анализа напряженного состояния представим его элементы в виде малых кубов (рис. 2) со сторонами, параллельными координатным плоскостям. Напряжения на каждой грани куба можно разложить на перпендикулярное (нормальное) σ и параллельное (касательное) τ .

Согласно принятой системе координат, матрица (3) дает полное описание напряжений в общем виде в точке A :

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Поскольку принято, что куб бесконечно мал, то напряжения на противоположных гранях равны согласно закону сопряженности или свойству симметричности матрицы тензора напряжений, т.е. $\tau_{xz} = \tau_{zx}$, $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$.

Известно, что при соответствующем выборе системы координат (на рис. 2 – $x'y'z'$) тензор напряжений приводится к простейшему виду, например; когда $\tau = 0$. Матрица тензора напряжений в этом случае примет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \sigma'_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma'_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma'_z \end{pmatrix}.$$

Наибольшее нормальное напряжение σ_{\max} является главным и обозначается σ_1 ; $\sigma_{\max} = \sigma_1$, наименьшее обозначается σ_3 ; $\sigma_{\min} = \sigma_3$, а оставшееся из трех обозначается σ_2 . Матрица тензора напряжений приводится к виду:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix}.$$

Цилиндрический объем пласта, взаимодействующий с криволинейным рабочим органом (рис. 2), состоит не только из малых кубов, но и малых призм, длина наклонных сторон которых представляет собой периметр эллипса (основания цилиндра).

Согласно принятым условиям, $\sigma = \sigma_2 = \sigma_3$, $\tau = 0$. На основании эллипса действует нормальное напряжение σ_1 , обусловленное подпором пласта почвы, а на цилиндрические поверхности (по периметру) сказывается давление режущих кромок рабочего органа. Таким образом, при нагрузке σ_1 и $\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ напряженное состояние задается матрицей:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 = \sigma & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 = \sigma \end{pmatrix}.$$

Интенсивность возникающих на поверхности цилиндра напряжений можно оценить, рассмотрев задачу о внутренней трещине эллиптической формы, расположенной в бесконечно протяженном сплошном теле под действием нагрузки. Для решения этой задачи в механике разрушения получили коэффициент интенсивности напряжений, с увеличением которого можно объективно судить об увеличении нагрузки на поверхность эллипса:

$$K_\sigma = \frac{\sigma \sqrt{\pi r}}{\mathcal{E}} \sqrt{\left(\sin^2 \mu + \frac{r^2}{R^2} + \cos^2 \mu \right)},$$

где \mathcal{E} – эллиптический интеграл второго рода, заданный соотношением:

$$\mathcal{E} = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \frac{R^2 - r^2}{R^2} \sin^2 \mu} d\mu.$$

Угол μ определяет полярную координату точки на периметре эллипса, в которой рассчитывается интенсивность возникающих напряжений. При $\mu = 0$ заданная точка расположена

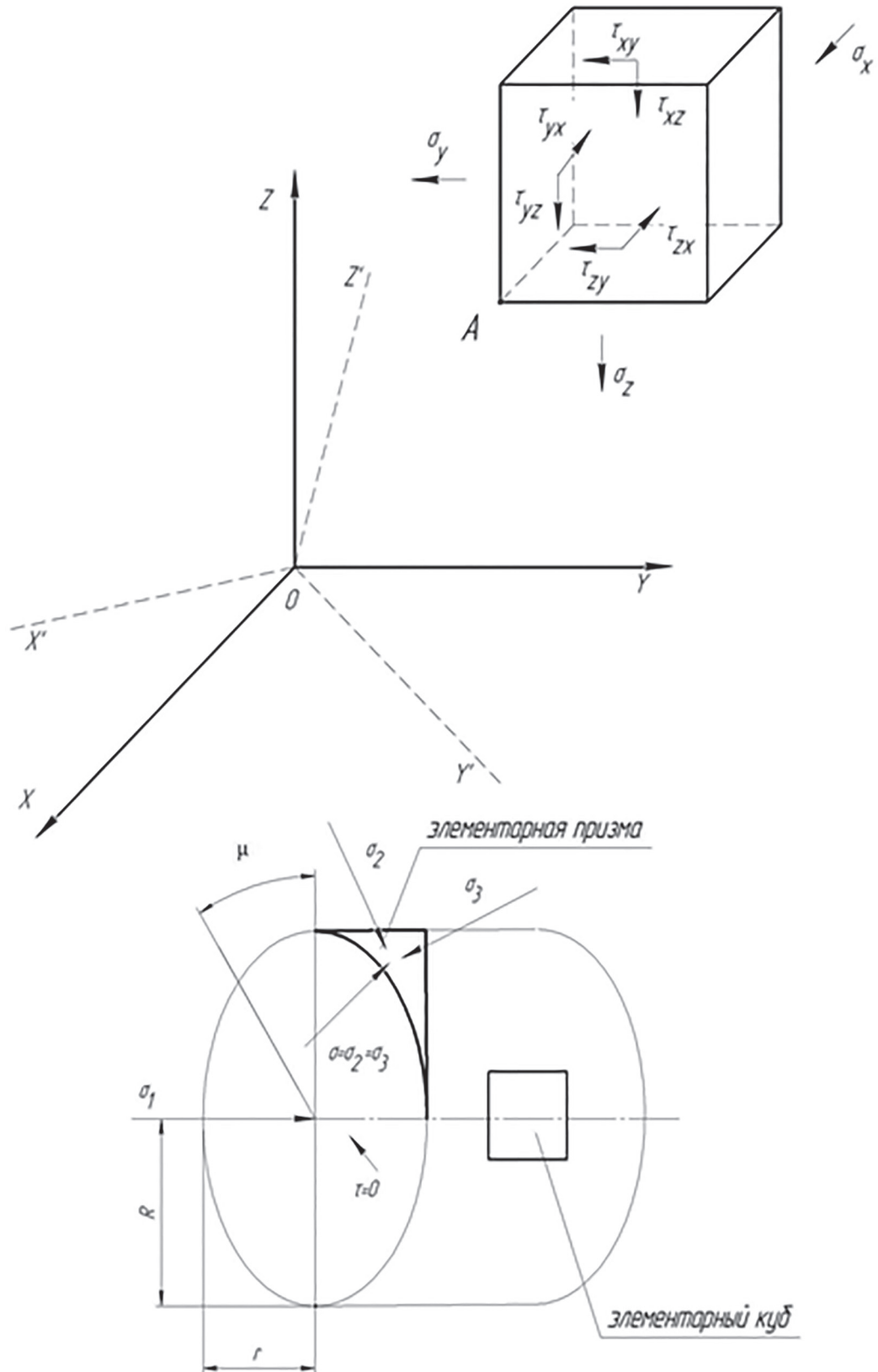


Рис. 2. Приложение теории напряженного состояния сплошной среды к взаимодействию криволинейного рабочего органа с почвой

на большем диаметре эллипса, при $\mu = \frac{\pi}{2}$ – на малом.

Выражение получено путем приведения к тригонометрической форме эллиптического интеграла второго рода в виде:

$$\int \frac{\sqrt{1 - \frac{R^2 - r^2}{R^2} x^2}}{\sqrt{1 - x^2}} dx$$

подстановкой $x = \sin \mu$ при $0 \leq \mu \leq \frac{\pi}{2}$.

Решение подобной задачи сводится к разложению подинтегрального выражения в степенной ряд в случае непрерывности членов и равномерной сходимости на рассматриваемом интервале:

$$\Theta = \frac{\pi}{2} \left[1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{R^2 - r^2}{R^2} - \frac{1^2 \cdot 3}{2^2 \cdot 4^2} \left(\frac{R^2 - r^2}{R^2} \right)^2 - \dots \right].$$

Эллиптический интеграл второго рода можно представить в виде ряда:

$$\Theta = \frac{\pi}{2} \left[1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{R^2 - r^2}{R^2} - \frac{3}{64} \left(\frac{R^2 - r^2}{R^2} \right)^2 - \dots \right]. \quad (4)$$

Анализ выражения (4) показал, что даже при малых значениях $\frac{r}{R}$ третий член в квадратных скобках дает вклад в полученный результат не более 5 %, поэтому в большинстве случаев им пренебрегают, т.е. $\frac{3}{64} \left(\frac{R^2 - r^2}{R^2} \right)^2 \approx 0$. Тогда в первом приближении эллиптический интеграл второго рода равен:

$$\Theta = \frac{3\pi}{8} + \frac{\pi}{8} \cdot \frac{r^2}{R^2}.$$

Тогда коэффициент интенсивности напряжений:

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma \sqrt{\pi r}}{\frac{3\pi}{8} + \frac{\pi}{8} \cdot \frac{r^2}{R^2}} \sqrt{\sin^2 \mu + \frac{r^2}{R^2} \cos^2 \mu}. \quad (5)$$

С учетом выбранного параметра [2] – коэффициента сжатия эллипса $k_{сж} = \frac{r}{R} = 0,69$, выполнив некоторые преобразования, получим выражение для определения коэффициента интенсивности напряжений, возникающих по периметру пласта почвы эллиптической конфигурации при взаимодействии с кольцевым рабочим органом.

В общем виде формула (5) может быть преобразована к виду:

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma \sqrt{\pi \alpha}}{\frac{\pi}{8} \left(3 + \sin^2 \frac{\beta + \varphi + \rho}{2} \right)} \times \sqrt{\sin^2 \mu + \left| \sin^2 \frac{\beta + \varphi + \rho}{2} \right| \cdot \cos^2 \mu}, \quad (6)$$

где $\alpha = r$ – глубина обработки почвы эллиптическим рабочим органом.

Формула (6) представляет выражение для определения коэффициента интенсивности напряжений, возникающих по периметру пласта почвы эллиптической конфигурации при взаимодействии с криволинейным рабочим органом.

Полученная зависимость (6) графически представлена на рис. 3 для различных углов крошения β (15, 25 и 35°).

В качестве исходных данных напряжение σ принято равным временному сопротивлению сжатия глинистого чернозема, которое для засушливых условий составляет 93...98 кПа [4].

Анализ графика свидетельствует о том, что наибольшая интенсивность напряжений локализована на концах малой оси эллипса ($\mu = 90^\circ$), а наименьшая – на концах большой оси ($\mu = 0^\circ$). Причем рост интенсивности напряжений неравномерный: наибольший приходится на область $\mu = 30^\circ \dots 60^\circ$, наименьший при $\mu = 0^\circ \dots 10^\circ$, $\mu = 80^\circ \dots 90^\circ$. С увеличением угла крошения β интенсивность напряжений увеличивается до $\mu = 30^\circ$, а далее снижается,

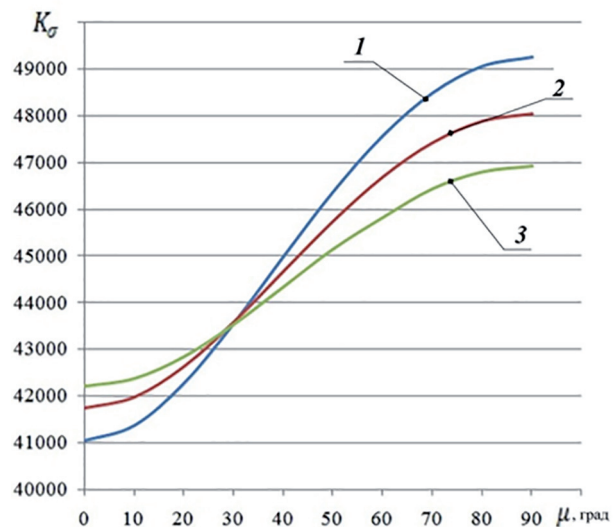


Рис. 3. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений по периметру эллипса от параметров рабочего органа:
1 – $\beta = 15^\circ$; 2 – $\beta = 25^\circ$; 3 – $\beta = 35^\circ$

что объясняется изменением коэффициента сжатия (параметра) эллипса ϵ_g , который зависит от угла β и определяет соотношение малой и большой осей эллипса.

На основе анализа графика на рис. 3 установлено, что наибольшая интенсивность напряжений возникает в области расположения горизонтальных режущих кромок рабочего органа, что следует учитывать при прочностных расчетах, поскольку неравномерность нагрузки способствует локальному износу кольца в указанной зоне. При этом переменная интенсивность напряжений по контуру пласта приводит к возникновению разнонаправленных деформаций (растяжения и сжатия), что благоприятно сказывается на качестве крошения и способствует снижению затрат энергии на обработку почвы рабочим органом.

Гудков А.Н. и Зотов Н.В. [7] получили выражение (7), характеризующее изменение количества силового потока внутри пласта, причиной возникновения которого является разность напряжений, подобно гидродинамической аналогии движения жидкости или газа под действием разности давлений. Количество силового потока представляет совокупность внешних сил под действием деформатора, создающих напряженное состояние пласта:

$$Q = K F t \frac{\sigma_n - \sigma_{n+1}}{l}, \quad (7)$$

где K – коэффициент, характеризующий сопротивление деформации; F – площадь поперечного сечения пласта; t – длительность воздействия; l – толщина слоя (глубина обработки); $\sigma_n - \sigma_{n+1}$ – напряжения на внешней и внутренней поверхностях слоя (напряжения на поверхности почвы и на глубине хода рабочего органа).

Анализ выражения (7) свидетельствует о том, что совокупность сил, создающих напряженное состояние пласта, возрастает с увеличением F , $t(\sigma_n - \sigma_{n+1})$ и уменьшается с ростом l . Поскольку количество силового потока определяет основные затраты энергии на выполнение технологической операции, то для снижения энергоемкости при соблюдении требуемых агротехнических показателей следует уменьшать толщину обрабатываемого слоя и увеличивать концентрацию и интенсивность напряжений путем выбора рациональных геометрии и формы рабочего органа, а также режимов функционирования, оказывающих непосред-

ственное влияние на величину длительности воздействия.

При форме рабочего органа в виде эллипса зона интенсивности напряжений в поперечном ($\mu = 30^\circ \dots 60^\circ$) направлении шире, чем у округлой режущей кромки, при этом в области боковых закруглений создаются деформации растяжения и изгиба, что отсутствует у плоскореза.

В связи с вышеизложенным целесообразно осуществлять послойную обработку почвы с использованием наименее энергоемких деформаций растяжения и изгиба, возникающих внутри пласта при функционировании эллиптического рабочего органа. При этом улучшается крошение при минимальных энергозатратах [8, 9].

С учетом полученных закономерностей разработана конструкция рабочих органов для послойной безотвальной обработки почвы с эллиптическим рыхлителем (рис. 4).

При этом, стойка трансформируемого рабочего органа выполнена по типу *paraplow* и также имеет криволинейную форму, описываемую уравнением брахистохроны первого порядка [10].

Исследования [11–13] показали, что новые рабочие органы с эллиптическим рыхлителем осуществляют качественную послойную безотвальную обработку почвы: степень крошения 87,1...98,5 % фракций до 50 мм, гребнистость 1...2 см, уменьшение эрозионно-опасных частиц 15...22 %, а его использование способствует снижению энергозатрат, поскольку тяговое сопротивление ниже на 0,5...1,3 кН по сравнению с плоскорезными аналогами.

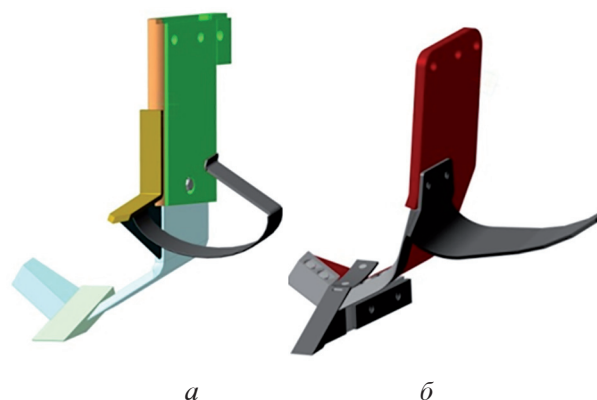


Рис. 4. Новые рабочие органы для послойной безотвальной обработки почвы с эллиптическим рыхлителем:

a – с разомкнутым кольцевым рыхлителем;
б – трансформируемый

Вывод

В результате исследований обоснована форма криволинейного рабочего органа, обеспечивающего повышение качества послойной безотвальной обработки почвы.

Литература

1. Пархоменко С.Г., Пархоменко Г.Г. Измерение силы тяги на крюке трактора в агрегате с навесной сельскохозяйственной машиной // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 4. С. 15–19.
2. Громаков А.В., Филатов С.К., Пархоменко Г.Г. Повышение эффективности функционирования машинно-тракторных агрегатов за счет применения биотоплива // Технология колесных и гусеничных машин. 2014. № 6 (16). С. 16–22.
3. Пойа Д. Математика и правдоподобные рассуждения. М.: Наука, 1975. 464 с.
4. Божко И.В. Обоснование параметров эллиптического рыхлителя рабочего органа для послойной безотвальной обработки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2015. 23 с.
5. Божко И.В., Пархоменко Г.Г., Громаков А.В. Обоснование конструкции рабочего органа для послойной безотвальной обработки почвы // Сборник статей 9-й международной научно-практической конференции «Инновационные разработки для АПК» ГНУ СКНИИМЭСХ Россельхозакадемии. Зерноград, 2014. С. 30–36.
6. Божко И.В., Пархоменко Г.Г. Предпосылки к обоснованию формы и геометрии кольцевого рабочего органа для обработки почвы // Проблемы механизации и электрификации сельского хозяйства: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Краснодар, 2014. С. 125–129.
7. Гудков А.Н., Зотов Н.В. Теоретические положения к выбору новой системы машин для обработки почвы // Исследования рабочих процессов сельскохозяйственных машин: труды Волгоградского СХИ. Том XXVI. Волгоград, 1968. С. 57–62.
8. Пархоменко Г.Г., Божко И.В. Взаимодействие кольцевого рабочего органа с обрабатываемым пластом почвы // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: материалы 7-й международной научно-практической конференции в рамках 17-й международной агропромышленной выставки «Интерагромаш-2014». Ростов-на-Дону, 2014. С. 39–42.
9. Божко И.В., Пархоменко Г.Г. Кольцевой рабочий орган для обработки почвы // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: материалы 7-й международной

научно-практической конференции в рамках 17-й международной агропромышленной выставки «Интерагромаш-2014». Ростов-на-Дону, 2014. С. 78–81.

10. Пархоменко Г.Г., Твердохлебов С.А. Обоснование параметров рабочего органа типа para-plow // Вестник АПК Ставрополя. 2017. № 1 (25). С. 44–48.
11. Пархоменко Г.Г., Божко И.В., Громаков А.В. Прогнозирование зоны износа эллиптического кольцевого элемента почвообрабатывающего рабочего органа // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 118. С. 64–68.
12. Пархоменко Г.Г., Божко И.В., Громаков А.В., Максименко В.А. Исследование новых рабочих органов для послойной безотвальной обработки почвы в засушливых условиях юга России // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 10. С. 6–9.
13. Пархоменко Г.Г., Семенихина Ю.А., Громаков А.В. Анализ агротехнических показателей рабочих органов для послойной безотвальной обработки почвы // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 5. С. 32–38.

References

1. Parkhomenko S.G., Parkhomenko G.G. Measuring the traction force on the hook of the tractor in an aggregate with a hinged agricultural machine. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016. No 4, pp. 15–19 (in Russ.).
2. Gromakov A.V., Filatov S.K., Parkhomenko G.G. Increase of efficiency of functioning of machine-tractor units due to application of biofuel. *Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin*. 2014. No 6 (16), pp. 16–22 (in Russ.).
3. Poya D. *Matematika i pravdopodobnye rassuzhdeniya [Mathematics and plausible reasoning]*. Moscow: Nauka Publ., 1975. 464 p.
4. Bozhko I.V. *Obosnovanie parametrov ellipticheskogo rykhlyatelya rabocheho organa dlya posloynoy bezotval'noy obrabotki: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Substantiation of the parameters of the elliptical ripper of the working member for layer-by-layer processing: abstract to dissertation for degree of Candidate of Technical Sciences]*. Krasnodar, 2015. 23 p.
5. Bozhko I.V., Parkhomenko G.G., Gromakov A.V. Substantiation of the design of the working element for layered soil-free tillage. *Sbornik statey 9-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Innovatsionnye razrabotki dlya APK» GNU SKNIIMESKh Rossel'khozakademii [Collection of articles of the 9th international scientific and practical conference «Innovative developments for the*

- agroindustrial complex» of the State Research Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture of the Russian Academy of Agricultural Sciences North-Caucasian Research Institute]. Zernograd, 2014, pp. 30–36 (in Russ.).
6. Bozhko I.V., Parkhomenko G.G. Prerequisites to the substantiation of the shape and geometry of the circular working body for tillage. Problemy mekhanizatsii i elektrifikatsii sel'skogo khozyaystva: Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Problems of mechanization and electrification of agriculture: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Krasnodar, 2014, pp. 125–129 (in Russ.).
 7. Gudkov A.N., Zotov N.V. Theoretical provisions for the selection of a new system of machines for tillage. Issledovaniya rabochikh protsessov sel'skokhozyaystvennykh mashin: Trudy Volgogradskogo SKhI [Research of work processes of agricultural machines: Proceedings of the Volgograd Agricultural Institute]. Vol. XXVI. Volgograd, 1968, pp. 57–62 (in Russ.).
 8. Parkhomenko G.G., Bozhko I.V. Interaction of the annular working body with the cultivated soil. Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: mater. 7-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii v ramkakh 17-y mezhdunarodnoy agropromyshlennoy vystavki «Interagromash-2014» [State and prospects for the development of agricultural machinery: materials of 7th International Scientific and Practical Conference within the framework of the 17th International Agro-Industrial Exhibition «Interagromash-2014»]. Rostov-na-Donu, 2014, pp. 39–42 (in Russ.).
 9. Bozhko I.V., Parkhomenko G.G. Annular working body for soil cultivation. Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: materialy 7-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii v ramkakh 17-y mezhdunarodnoy agropromyshlennoy vystavki «Interagromash-2014» [State and prospects for the development of agricultural machinery: materials of 7th International Scientific and Practical Conference within the framework of the 17th International Agro-Industrial Exhibition «Interagromash-2014»]. Rostov-na-Donu, 2014, pp. 78–81 (in Russ.).
 10. Parkhomenko G.G., Tverdokhlebov S.A. Justification of parameters of working body of para-plow type. Vestnik APK Stavropol'ya. 2017. No 1 (25), pp. 44–48 (in Russ.).
 11. Parkhomenko G.G., Bozhko I.V., Gromakov A.V. Forecasting the wear zone of the elliptical annular element of the tillage tool. Trudy GOSNITI. 2015. Vol. 118, pp. 64–68 (in Russ.).
 12. Parkhomenko G.G., Bozhko I.V., Gromakov A.V., Maksimenko V.A. Investigation of new working organs for layerwise soil-free tillage in arid conditions of southern Russia. Traktory i sel'khoz mashiny. 2015. No 10, pp. 6–9 (in Russ.).
 13. Parkhomenko G.G., Semenikhina Yu.A., Gromakov A.V. Analysis of agrotechnical indices of working organs for layered soil-free tillage. Traktory i sel'khoz mashiny. 2017. No 5, pp. 32–38 (in Russ.).