

DOI: 10.12737/article_5b97a15e471834.37136442

УДК 631.51; 631.312.8

ВЫБОР ВИДА ДЕФОРМАЦИИ И ТИПА ДЕФОРМАТОРА ОБРАБОТКИ СУХИХ ТВЕРДЫХ ПОЧВ

доктор технических наук, профессор **И. М. Бартнев**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

Сухие твердые почвы по своим физико-механическим свойствам близки к горным породам и мерзлым грунтам. Они хорошо работают на сжатие, то есть при воздействии обычного лемешно-отвального плужного корпуса в них возникает огромная внутренняя энергия, противодействующая разрушению глыб и комков. В тоже время твердые почвы имеют малую способность к сопротивлению растягивающим их силам и, следовательно, малую ударную вязкость. Опираясь на работы многих отечественных и зарубежных ученых в области разрушения твердых горных пород и мерзлых грунтов, в данной статье дается обоснование ударного разрушения почвенных глыб в процессе основной обработки почвы в зоне недостаточного и неустойчивого увлажнения с целью получения высокой степени крошения, снижения энергоемкости, повышения рабочих скоростей и активного оборота почвенного пласта. Наиболее эффективным способом ударного разрушения почвенных глыб и в целом почвенного пласта является свободный удар – удар на лету по глыбам и пласту, оторванными от массива почвы, поднятыми над дном борозды и находящимися в воздухе, вращающимся ударником на вертикальной оси. Свободный удар совмещает в себе кинетическое ударное и следующее за ним ударно-отражательное дробление, осуществляемые соответственно при непосредственном воздействии ударника и дополнительно при ударе отбрасываемых почвенных отдельных частей о пахотный слой от предыдущего прохода пахотного агрегата, доводя степень крошения почвенного пласта до уровня «хорошая» и «очень хорошая» и производя одновременно транспортирование и оборот почвенного пласта.

Ключевые слова: сухие твердые почвы, горные породы, мерзлый грунт, почвенный пласт, глыбы, свободный удар, разрушение, оборот пласта, транспортирование, деформации, волна напряжений.

THE CHOICE OF THE TYPE OF DEFORMATION AND TYPE OF DEFORMER FOR DRY SOLID SOILS PROCESSING

DSc in Engineering, Professor **I. M. Bartenev**

Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation

Abstract

Dry solid soils are close to rocks and frozen soils in their physical and mechanical properties. They work well for compression, that is, a huge internal energy arises in them under the influence of a conventional plow-and-dump plowing body, counteracting the destruction of lumps. At the same time, solid soils have a small ability to resist the tensile forces and, consequently, small impact strength. Based on the work of many domestic and foreign scientists in the field of destruction of hard rocks and frozen soils, this article substantiates the impact destruction of soil blocks during the main soil cultivation in the zone of insufficient and unstable moistening in order to obtain a high degree of crumbling, lower energy intensity, speeds and active circulation of soil layer. The most effective way of impact destruction of soil blocks and the whole soil layer is a free shot - a shot on the fly over blocks and seam removed from the soil massif, raised above the bottom of the furrow and located in the air, with drummer rotating on the vertical axis. A free shot combines kinetic shock and the subsequent shock-reflective crushing effected by the direct impact of the impactor, and in addition, when the discarded soil separations strike the arable layer from the previous passage of the arable aggregate, bringing the degree of crumbling of soil formation to the level of "good" and "very good" and simultaneously producing transportation and circulation of the soil layer.

Keywords: dry solid soils, rocks, frozen soil, soil layer, blocks, free impact, destruction, rotation of the layer, transportation, deformation, stress wave

В каком бы состоянии ни находилась почва, механическая обработка ее всегда направлена на образование оптимальных условий для посева семян и посадки культур, на борьбу с сорной растительностью, на накопление и экономное расходование влаги и защиту почв от эрозии. Это обеспечивается при определенных значениях степени крошения продуктивного слоя почвы и плотности его сложения. Степень подготовки почвы характеризуется количеством комков размером менее 50 мм и содержанием пыли (табл.).

Получить высокую степень крошения почвенного пласта можно только в результате его разрушения. Почвенный пласт должен быть подвергнут деформациям, при осуществлении которых возникающие напряжения превышают внутренние связи. Применяются различные виды деформации: растяжение, сжатие, сдвиг, изгиб и кручение, основными из которых являются растяжение и сжатие, а остальные напряжения – производные.

Выбор определенного вида деформации соотнобразуется с физико-механическими свойствами и состоянием почвы, с получением обработанного слоя почвы, обеспечивающего благоприятные условия для роста и высокой продуктивности культурных растений при минимальных затратах энергии, затрат и труда. Правильно выбранный вид деформации сухих твердых почв – это технологическая основа создания высокоэффективных рабочих органов почвообрабатывающих орудий.

Известно, что почвы хорошо работают на сжатие. Причем сопротивление резко возрастает с уменьшением влажности почвы. Например, при уменьшении влажности с 27,8 до 7,2 % сопротивление средней глины сжатию увеличивается с 0,58 до 3,52 МПа, т.е. в 6 раз [7].

Наименьшее сопротивление сжимающим усилиям почва имеет в состоянии физической спелости, т.е. когда в почве содержится 40-50 % влаги от полной влагоемкости или когда весовая влажность почв, например, каштанового комплекса составляет 15-17 %. В этом случае обеспечивается высококачественное крошение почвы, равное 75-83 % при минимальном распылении – до 10 %.

Однако почвы в зоне недостаточного и неустойчивого увлажнения большей частью во времени имеют влажность ниже агротехнически допустимых пределов и находятся в весьма плотном и слитом состоянии. Поэтому при сжатии таких почв возникает огромная внутренняя энергия, противодействующая их разрушению.

По своим физико-механическим и технологическим свойствам сухие твердые почвы относятся к хрупким материалам, в которых под действием внешних нагрузок происходит полное разрушение связей. Они обладают малой ударной вязкостью и малым сопротивлением растягивающим их силам. При деформации растяжения, сдвига и изгиба сухие твердые почвы выдерживают в 10...30 раз меньше нагрузки, чем при сжатии [5]. Сопротивление сжатию супеси, среднего суглинка и средней глины больше сопротивления сдвигу в 19,0; 24,3 и 29,4 раза; сопротивление сжатию глинистого чернозема больше сопротивления сдвигу и растяжению, соответственно, в 10 и 20 раз [8].

Сухие твердые почвы имеют малую линейную деформацию, и она не следует закону Гука, диаграмма получается криволинейной. При этом диаграммы сжатия и растяжения по характеру аналогичны, но предел прочности при растяжении значительно ниже, чем предел прочности при сжатии.

Таблица

Оценка пашни по шкале крошения [5]

Оценка пашни	Количество (%) комков размером до 50 мм	Содержание пыли, %
Очень хорошая	90-100	5
Хорошая	70-90	5-10
Удовлетворительная	50-70	10-15
Плохая	30-50	15-20
Очень плохая	Менее 30	Более 20

Разрушению внутренних связей сухих твердых почв при растягивающих усилиях с малыми затратами энергии способствует еще то, что в таких почвах имеются поры, пустоты и трещины, заполненные воздухом, сумма которых образует в пласте с так называемыми сечениями слабых связей, по линиям которых и происходит разрушение почвенного пласта.

Учитывая положительные, с энергетической точки зрения, свойства сухих твердых почв, такие как хрупкость, малая способность к сопротивлению растягивающих их силам, исследователи, занимающиеся обработкой этих почв, рекомендуют использовать деформации растяжения и изгиба. При этом, чтобы получить требуемое крошение почвы, необходимо использовать малую ударную вязкость почв. В этом случае скорость воздействия рабочих органов почвообрабатывающих орудий должна быть равна или больше той, которую может выносить почва, и составляет 6-9 м/с, т.е. 21,5-36 км/ч [9, 15].

Движение пахотного агрегата с такой скоростью трудно осуществить. Поскольку разрушение пласта плугом производится в результате непрерывного давления, т.е. путем сжатия, то при увеличении скорости движения резко возрастает тяговое сопротивление, что является большим недостатком и не может быть принято в качестве способа получения высокого качества крошения почвы. При повышении скорости мощность сил инерции возрастает в кубе, увеличиваются толчки, вследствие чего конструкция плуга, как отмечает В.П. Горячкин, должна быть особенно жесткой. При непрерывном давлении масса плуга не влияет на степень крошения почвы, и она должна быть такой, при которой запас прочности достаточен для преодоления сил сопротивления.

Однако, масса рабочих органов приобретает новое значение, если разрушение почвы производить не непрерывным давлением, а ударом, когда сила P действует в виде импульса, толчком, продолжительность которого равна Δt и исчисляется долями секунды [12, 15].

В момент удара, благодаря практически мгновенному протеканию процесса перехода энергии в разрушаемый пласт, на лезвии рабочего органа развиваются большие силы при одновременно относительно низкой энергоемкости.

При динамическом воздействии возникает бо-

лее выгодная силовая схема. В обычном плуге реакция почвы, достигающая большой величины, воспринимается всей конструкцией, что приводит к увеличению массы и требует повышенной прочности плуга. При ударном воздействии реакция, возникающая во время удара, замыкается в системе почва – ударник машины и лишь в незначительной мере передается на узлы основной конструкции, которые обладают большей компактностью и меньшей массой при прочих равных условиях.

Следовательно, применяя динамическое разрушение, можно воздействовать на почвенный пласт со скоростью 6-9 м/с малой массой рабочего органа. Существуют различные способы динамического разрушения разных материалов. Для разрушения сухих твердых глыб следует применять способы, при которых достигается оптимальное соотношение между массой рабочего органа и скоростью, чтобы вместить возможно больше механической энергии в единицу массы и получить требуемый эффект при минимальной работе. При этом почвенный пласт должен быть не только разрушен на фракции оптимальных размеров, но и обернут и уложен на новое место в соответствии с предъявляемыми требованиями.

Известные способы ударного разрушения почвенного пласта основаны на применении как комбинированных рабочих органов, включающих в плугах лемешно-отвальный корпус и установленный за ним ударник или роторный рыхлитель, так и из одних ударников в виде фрез с вертикальной или горизонтальной осью вращения и вибрирующего корпуса или его деталей (лемеха, долота). В зависимости от типа применяемых средств динамического воздействия почвенный пласт разрушается в результате удара, когда он находится в связи с массивом почвы (фрезы, вибрирующий корпус и его детали, дробилки и импульсный ударник) или оторван от массива (лемешно-отвальный корпус с роторным рыхлителем).

При этом связь пласта с массивом почвы может быть различной. Пласт не оторван от общего массива, имея две открытые поверхности – верхняя дневная стенка и стенка борозды. Пласт представлен в виде отдельных глыб, то есть он предварительно разрушен, например, путем обычной вспашки. Глыбы расположены на поверхности почвы и имеют контакт с массивом только в горизонтальной плоскости.

В первом случае разрушение пласта производится вибрирующим корпусом или его деталями, импульсным ударником и фрезами; во втором – ударниками, соединенными жестко или с помощью гибкой связи с горизонтальной осью вращения.

Вибрация корпуса или его деталей уменьшает трение между движущимися относительно друг друга телами и частицами, то есть уменьшается внутреннее и внешнее трение, а следовательно, и тяговое сопротивление на 15-30 %. Однако, эффект от вибрации, хотя и достигается на почвах с пониженной влажностью, но при очень малой скорости поступательного движения агрегата (0,6 м/с) [12].

Общий расход энергии при обработке почвы вибрирующими рабочими органами превышает количество энергии, необходимое для обработки почвы обычными рабочими органами. Применение вибраторов вызывает необходимость принятия мер для предупреждения самоотвинчивания всех резьбовых соединений. Они усложняют и удорожают машину, увеличивают опасность травмирования обслуживающего персонала.

Поэтому вибрацию рабочих органов рекомендуется применять в специфических условиях, например, когда тяговое усилие трактора недостаточно для выполнения таких работ, как рыхление киров, закрытый дренаж и т.п. [10].

Импульсные воздействия на рабочие органы целесообразнее непрерывного вибрирования, так как в этом случае на бесполезное встряхивание пласта и орудия энергия почвы совсем не расходуется. Обычно импульсный ударник устанавливается за каждым корпусом плуга, наносит 3-5 ударов на 1 м пути о стенку борозды [8, 12].

В этом случае масса ударяемого тела несравненно больше массы ударника $m_2 \gg m_1$, $\frac{m_1}{m_2} \approx 0$. Ударяемое тело до и после удара остается неподвижным. Скорость ударника после удара изменяет знак на обратный, то есть происходит отскок, $v_1 = -v_{01}$. Величина отскока находится по формуле:

$$\xi = \frac{v_1}{v_{01}} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2}, \quad (1)$$

С учетом $m_1/m_2=0$

$$\xi = \frac{\frac{m_1}{m_2} - 1}{\frac{m_1}{m_2} + 1} \approx -1$$

Следовательно, скорость отскока приближает-

ся к скорости удара. Кинетическая система до удара

$$W_0 = \frac{m_1 v_{01}^2}{2}, \quad (2)$$

и после удара

$$W_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot \frac{m_1 v_{01}^2}{2} \quad (3)$$

Потеря кинетической энергии в результате удара составляет

$$\Delta W = W_0 - W_1 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_{01}^2 = -\frac{1}{2} \cdot m_1 v_{01}^2, \quad (4)$$

то есть ударник теряет свою энергию на разрушение связей в почвенном массиве. В результате в зоне контакта происходит измельчение и смятие почвы. За ней возникает весьма сложное поле напряжений. В зоне контакта напряжение возрастает за весьма короткое время. Скорость роста напряжений достигает при этом нескольких тысяч Па/с. Движение волны напряжений описывается волновым уравнением [11]

$$\frac{d^2 u}{dj^2} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{d^2 u}{dt^2} = 0, \quad (5)$$

где $\frac{du}{dj}$ – относительное удлинение от продольного перемещения в любом сечении;

$\frac{du}{dt}$ – скорость частицы почвы;

j – направление движения волны;

t – время перемещения сечения;

c – скорость волны.

За время t , масса грунта, охваченная волной, приобретает импульс

$$i = \int_0^t P dt = \rho c t u, \quad (6)$$

где ρ – плотность почвы, и частицы почвы приходят в движение, если величина напряжений превосходит внутренние связи.

Скорость смещения частиц принято называть массовой скоростью. Массовая скорость и напряжение связаны функциональной зависимостью в силу закона Ньютона:

$$\sigma = \rho \cdot c \cdot v, \quad (7)$$

где v – массовая скорость.

Величина $\rho \cdot c$ – акустическая жесткость, численное значение которой представляет собой напряжение, возникающее в почве в результате удара со скоростью, равной единице. Для почвы $\rho \cdot c = 0,1$ бар.см/с, это значит, что при нанесении удара со скоростью 1 м/с в почве возникает внутреннее напряжение 0,1 бар.

Критическое напряжение, приводящее к образованию трещин, в результате чего первоначально

поглощенная энергия освобождается и часть ее движется впереди начала трещин в виде волн деформации, выражается зависимостью

$$\sigma_{кр} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l(1-\nu^2)}} \quad (8)$$

где l – половина длины трещины;

γ – плотность поверхности энергии при постоянных условиях;

ν – коэффициент Пуансона;

E – модуль упругости.

Скорость распространения волн напряжений и деформаций зависит от состояния почво-грунтов, то есть от их плотности и влажности, и не зависит ни от ударного импульса, ни от скорости удара. Отдельные точки волн напряжений движутся с различными скоростями. Наибольшие значения скоростей соответствуют началам этих процессов, а наименьшие – движению гребней волн. При плотных грунтах напряжения распространяются со скоростью 400-600 м/с, а гребни напряжений и деформаций – со скоростью 80-150 м/с. В рыхлых грунтах в 2-3 раза меньше [13].

По мере удаления от места удара энергия волны в результате работы, совершенной ею в почве, уменьшается. Вследствие этого уменьшается величина напряжения на фронте волны. Хорошую аппроксимацию этого явления дают уравнения [6]:

для плоской волны

$$\sigma = k_y \cdot e^{-ar}, \quad (9)$$

для сферически расширяющейся волны

$$\sigma = k_y \frac{r_0}{r} \cdot e^{-ar}, \quad (10)$$

для цилиндрически расширяющейся волны

$$\sigma = k_y \sqrt{\frac{r_0}{r}} \cdot e^{-ar}, \quad (11)$$

где σ – пиковое давление на фронте волны;

a – коэффициент затухания;

r – расстояние, пройденное волной;

k_y – коэффициент, зависящий от силы удара;

$\sqrt{\frac{r_0}{r}}$ – выражение, определяющее затухание,

обусловленное влиянием числа геометрических факторов.

Импульсное воздействие эффективно, когда материал однородный и не имеет поверхностей раздела. Почва же, особенно верхний слой, пронизана корнями и многочисленными трещинами, заполненными воздухом или водой. Падающая волна при пе-

реходе раздела, заполненного водой или корнями, частично проходит, частично отражается. Если падающая волна является волной сжатия, то отраженная часть может быть волной сжатия или растяжения. Соответствующие амплитуды отраженной и прошедшей волн выражаются соотношениями [6]

$$\sigma_R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \cdot \sigma_1; \quad (12)$$

$$\sigma_T = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \cdot \sigma_1; \quad (13)$$

где σ_1 , σ_T , σ_R – уровень напряжений на поверхности раздела, соответственно для падающей, проходящей и отраженной волн;

ρ_1 , ρ_2 – соответственно плотности обеих сред;

c_1 , c_2 – скорость распространения волн для этих сред.

При вспашке разделы между почвенными отдельностями заняты воздухом. Каждая трещина, занятая воздухом, является своего рода фильтром, пропускающим только нормальную к ней компоненту количества движения. Падающая волна большей частью отражается в виде волны растяжения.

Поэтому почвенный пласт является плохим передатчиком количества движения, переносимого волнами напряжений. Крошение пласта при импульсивном воздействии ограничивается зоной, прилегающей непосредственно к месту удара. Импульсные ударники не могут решить проблему регулируемого крошения почвенного пласта по всей его толщине.

Аналогичные процессы происходят и в случае находящихся на поверхности пашни почвенных глыб дробилками, в которых молотки соединены шарнирно с барабаном. В конструкции подобных дробилок нельзя применять молотки, так как они при больших скоростях вращения обладают значительными центробежными силами, что опасно. Поэтому рекомендуется применять сравнительно легкие молотки [2].

В роторных дробилках масса молотка значительно меньше ударяемого тела, то есть $m_1 < m_2$. Скорость ударника после удара изменяет знак на обратный, происходит отскок его.

В зависимости от того, в каком положении окажется глыба относительно молотка, удар может быть нанесен сверху или сбоку. В первом случае кинетическая энергия молотка, определяемая по формуле (2), будет полностью передаваться глыбе и $\xi \approx -1$. Во втором случае отскок молотка, вследствие поступа-

тельного движения агрегата, будет меньше и будет передана только часть энергии.

$$\Delta W = -\frac{1}{2} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_{01}^2 \quad (14)$$

При нанесении удара сверху почвенная глыба остается неподвижной, воспринимает кинетическую энергию ударника (молотка) и деформируется. Законы образования волн напряжений и деформаций остаются теми, что имеют место при нанесении удара о стенку борозды. Но благодаря тому, что глыба связана с массивом почвы только в одной плоскости, с поверхностью почвы, то поглощение ею приводит к более интенсивному дроблению. Этому также способствует то, что падающая волна напряжений при выходе на поверхность глыбы, граничащей с воздухом, отражается полностью в виде растяжения, т. е.

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_R = -\sigma_1 \\ \sigma_T = 0 \end{array} \right\} \quad (15)$$

Удар по глыбе сбоку по своему характеру воздействия на ударяемое тело близок к свободному удару. Свободный удар – удар на лету, то есть диспергирование движущегося куска породы в результате соударения с движущимся ударником или с неподвижной массивной преградой [3].

Этот способ в настоящее время находит все большее применение для разрушения горных пород, относящихся как и сухие твердые почвы к хрупким материалам. Он свободен от весьма энергоемких так называемых контактных явлений, которые наблюдаются при воздействии импульсивным ударником или молотком дробилки, когда в последней удар наносится под углом 0-65° от вертикали. Контактные явления – это смятие и уплотнение материала в приконтактной зоне. На образование контактных зон расходуется до 95-97 % всей энергии, затрачиваемой на разрушение [14].

Разрушение в результате соударения с движущимся ударником относится к кинетическому ударному дроблению. Отброшенный ударником разрушенный материал на отдельные фракции, каждая из которых перемещается по определенной траектории, при падении ударяется о неподвижную преграду, происходит дополнительное разрушение за счет ударно-отражательного дробления. Свободный удар совмещает в себе обе части затрачиваемой энергии на дробление – кинетическое ударное и ударно-отражательное.

Крошение сухих твердых почв по способу свободного удара может производиться, если почвенный пласт отделить от массива и подавать его на движущийся ударник, который должен не только разрушать, но и обернуть пласт, перемещая его на некоторое расстояние. По данной технологии рабочего процесса предоставляется возможным производить разрушение пласта в результате одновременно действующих кинетического и ударно-отражательного дробления.

Первый способ осуществляется при непосредственном воздействии ударника на пласт, а второй – при ударе отбрасываемых ударником глыб и комков о пашню. Это позволяет еще больше усилить одно из преимуществ свободного удара – его низкую удельную энергоемкость.

При ударе по почвенным глыбам отрезанного и оторванного от дна борозды пласта ударник теряет часть своей энергии, передавая ее разрушенному материалу, который используется на крошение и отбрасывание. Производить крошение, отбрасывание и оборот пласта целесообразнее ударником вращающегося типа, имеющего жесткую связь с ротором, для которого в соответствии с законом сохранения энергии

$$W_0 = W_1 + W_2, \quad (16)$$

где W_0 – кинетическая энергия ротора до удара;

W_1 – кинетическая энергия ротора после удара;

W_2 – кинетическая энергия, затрачиваемая на содержание ударника ротора с глыбой.

$$W_0 = \frac{Y_{\text{ВМ}} \cdot \omega_0^2}{2}, \quad (17)$$

где $Y_{\text{ВМ}}$ – момент инерции вращающихся масс ротора;

ω_0 – угловая скорость ротора до удара.

$$W_1 = \frac{Y_{\text{ВМ}} \cdot \omega_1^2}{2}; \quad W_2 = \frac{Y_{\text{ВМ}} \cdot v_0^2}{2}, \quad (18)$$

где ω_1 – угловая скорость ротора после удара;

v_0 – скорость, сообщаемая ротором почвенным отдельностям после удара, $v_0 = \omega_1 R_p$;

R_p – радиус ротора в точке удара.

$$\frac{Y_{\text{ВМ}} \cdot \omega_0^2}{2} = \frac{Y_{\text{ВМ}} \cdot \omega_1^2}{2} - \frac{m_2 v_0^2}{2}, \quad (19)$$

или

$$Y_{\text{ВМ}} \cdot \omega_0^2 = Y_{\text{ВМ}} \cdot \omega_1^2 - m_2 v_0^2. \quad (20)$$

Откуда

$$\omega_1 = \omega_0 \sqrt{\frac{Y_{\text{ВМ}}}{Y_{\text{ВМ}} + m_2 R_p^2}}. \quad (21)$$

Кинетическая энергия, затрачиваемая на соударение,

$$W_2 = \frac{Y_{\text{ВМ}} \cdot \omega_0^2}{2} - \frac{\omega_0^2 \cdot Y_{\text{ВМ}}^2}{2(Y_{\text{ВМ}} + m_2 R_p^2)}. \quad (22)$$

Потери угловой скорости ротора в результате удара равны $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_1$. При этом скорость вращения ротора уменьшается на

$$\Delta n = \frac{30\Delta\omega}{\pi}. \quad (23)$$

Время, по истечении которого ротор должен увеличивать угловую скорость с ω_1 до ω_0 , то есть время от удара до удара составит:

$$t = \frac{60}{n \cdot k_p}, \quad (24)$$

где n – частота вращения ротора;

k_p – число продольных рядов ударников на роторе.

Для обеспечения последующего удара по почвенному пласту со скоростью ω_0 двигатель должен сообщить ускорение разгона ротору $i = \Delta n/t$. Крутящий момент двигателя, необходимый для обеспечения ускорения разгона:

$$M_{\text{кр}} = \frac{GD^2}{375} i, \quad (25)$$

где GD^2 – маховой момент вращающихся масс.

За время полета кинетическая энергия каждой почвенной отдельности, брошенной ротором, уменьшается на величину, определяемую по формуле (22).

К моменту соударения с поверхностью пашни каждая почвенная отдельность будет обладать кинетической энергией

$$W'_2 = W_2 - \Delta W = \frac{m_2 v_2^2}{2}, \quad (26)$$

величина которой будет достаточной для разрушения на более мелкие фракции по линиям наименьших связей. Этот запас кинетической энергии расходуется

не только на дополнительное разрушение комков, как летящих и лежащих на поверхности пахотного слоя, но и внедрение их в пашню, то есть

$$\frac{m_2 v_2}{2} = A + pFe, \quad (27)$$

где A – часть энергии, расходуемая на создание критического напряжения, определяемого по формуле (8), в почвенных комках;

p – давление на единицу поверхности пашни со стороны падающих комков;

F – площадь сечения комка;

e – глубина внедрения комка в пашню.

Из анализа различных способов динамического воздействия на почвенный пласт следует, что менее энергоемким и более эффективным способом разрушения является совмещение кинетического ударного и ударно-отражательного крошения. Ударно-отражательное крошение следует за кинетическим ударным. В качестве преграды при ударно-отражательном крошении является пахотный слой от предыдущего прохода пахотного агрегата.

Применение свободного удара позволяет, используя кинетическое ударное разрушение, производить транспортировку и оборот почвенного пласта. При этом неременным условием применения свободного удара является предварительное отделение почвенного пласта от массива, подъем его в воздух над дном борозды и затем подача к рабочему органу, осуществляющему кинетическое ударное разрушение. Данный технологический процесс реализован в конструкции комбинированного корпуса плуга-рыхлителя ПРН-40.

Библиографический список

1. Александров, Е. Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем [Текст] / Е. Б. Александров, В. Б. Соколинский. – М. : Наука, 1969. – С. 25-27.
2. Барабашкин, В. П. Молотковые и роторные дробилки [Текст] / В. П. Барабашкин. – М. : Недра, 1973. – С. 43-109.
3. Барон, Л. И. Разрушаемость горных пород свободным ударом [Текст] / Л. И. Барон, И. К. Хмельковский. – М. : Наука, 1971. – 203 с.
4. Бахтин, П. У. Физико-механические и технологические свойства почв [Текст] / П. У. Бахтин. – М. : Знание, 1971. – 64 с.
5. Гудков, А. Н. Теоретические основы вспашки твердых почв и обоснование конструкции плуга [Текст] / А. Н. Гудков // Материалы ВИСХОМ. «Усовершенствование орудий для основной обработки почвы». – М., 1959. – Вып. 5. – С. 212-241.

6. Джон, С. Действие напряжений в гонных породах [Текст] / С. Джон, Д. С. Рейнхардт // Разрушение и механика горных пород. – М. : Гос. изд-во по горному делу, 1962. – С. 142-150.
7. Коньсбаев, К. К. Исследование параметров и режимов работы трехгранного клина, его энергетических и технологических показателей [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук / К. К. Коньсбаев. – Алма-Ата, 1966. – 24 с.
8. Резание и ударное разрушение грунтов [Текст] / И. А. Недорезов [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1965. – 133 с.
9. Панов, И. М. Крошение почвы комбинированными плужными корпусами [Текст] / И. М. Панов, В. А. Шмонин // Тракторы и сельхозмашины. – 1970. – № 2. – С. 18-20.
10. Синеоков, Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин [Текст] / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов. – М. : Машиностроение, 1977. – 326 с.
11. Сушков, В. В. Механика разрушения мерзлых грунтов [Текст] / В. В. Сушков. – Л. : Стройиздат, 1972. – 128 с.
12. Уфиркин, Н. А. Исследование процесса разрушения почвы ударными нагрузками с целью повышения эффективности работы плугов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н. А. Уфиркин. – М., 1970. – 24 с.
13. Дорожные машины [Текст] / Н. Я. Хархута [и др.]. – Л. : Машиностроение, 1968. – С. 13-22, 200-220.
14. Хлебников, Г. Д. Исследование закономерностей разрушения горных пород при дроблении [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. Д. Хлебников. – М., 1968. – 24 с.
15. Хоанг, Ч. Разрушение почвенных глыб ударом [Текст] / Ч. Хоанг // Мех. и электр. соц. сельского хозяйства. – 1968. – № 10. – С. 38-39.

References

1. Aleksandrov E. B., Sokolinsky V. B. *Prikladnaja teorija i raschety udarnyh sistem* [Applied theory and methods of shock systems]. Moscow, 1969, pp. 25-27 (In Russian).
2. Barabashkin V. P. *Molotkovye i rotornye drobilki* [Molotkovsky and rotor crushers] Moscow, 1973, pp. 43-109 (In Russian).
3. Baron L. I., Hmelkovsky I. K. *Razrushaemost' gornyh porod svobodnym udarom* [The destructibility of rocks is a consolidated blow] Moscow, 1971, 203 p. (In Russian)
4. Bahtin P. U. *Fiziko-mehaničeskie i tehnologičeskie svoystva pochv* [Physico-mechanical and technological properties of soils]. Moscow, 1971, 64 p. (In Russian)
5. Gudkov A. N. *Teoreticheskie osnovy vspashki tverdyh pochv i obosnovanie konstrukcii pluga* [Theoretical foundations of plowing solid soils and views of the structures of the plagi.] *Materialy VISHOM. «Usovershenstvovanie orudij dlja osnovnoj obrabotki pochvy»* [Materials VISHOM. "Improvement of tools for the main tillage"]. Moscow, 1959, Vol. 5, pp. 212-241 (In Russian).
6. Dzhon S., Rejnhardt D. S. *Dejstvie naprjazhenij v gonnyh porodah* [Existing stresses in gonnoy rocks] *Sbornik «Razrushenie i mehanika gornyh porod»* [Collection "The destruction and mechanics of rocks]. Moscow, 1962, pp. 142-150 (In Russian).
7. Konysbaev K. K. *Issledovanie parametrov i rezhimov raboty trehgrannogo klina, ego jenergetičeskij i tehnologičeskij pokazatelej. Avt-t dis. na soisk. uch. st. kand. tehn. nauk* [Research of parameters and operating modes of a trihedral wedge, ego of energy and technological communities. Avt-t dis. na soisk. Uch. st. Cand. tech. sciences.] Alma-Ata, 1966, 24 p. (In Russian)
8. Nedorezov I. A. [et al.] *Rezanie i udarnoe razrushenie gruntov* [Cutting and remote destruction of soils] Novosibirsk, 1965, 133 p. (In Russian)
9. Panov I. M., Shmonin V. A. *Kroshenie pochvy kombinirovannymi pluzhnymi korpusami* [The crumbling of the soil united plow bodies] *Traktory i sel'hoz mashiny*. [Tractors and agricultural machinery]. 1970, no. 2, pp. 18-20 (In Russian)
10. Sineokov G. N., Panov I. M. *Teorija i raschet pochvoobrabatyvajushhij mashin* [Theory and distribution of tillage machines] Moscow, 1977, 326 p. (In Russian)

11. Sushkov V. V. *Mehanika razrushenija merzlyh gruntov* [Mechanics of the destruction of frozen soils] Leningrad, 1972, 128 p. (In Russian)
12. Ufirkin N. A. *Issledovanie processa razrushenija pochvy udarnymi nagruzkami s cel'ju povyshenija jeffektivnosti raboty plugov. Avt-t dis. na soisk. uch. st. kand. tehn. nauk* [The study of the process of destruction of the soil shock loads in order to improve the efficiency of plug-ins. Avt-t dis. ... Cand. tech. sciences] Moscow, 1970, 24 p. (In Russian)
13. Harhuta N. Ja. [et al.] *Dorozhnye mashiny* [Road cars] Leningrad, 1968, pp. 13-22, 200-220 (In Russian).
14. Hlebnikov G. D. *Issledovanie zakonomernostej razrushenija gornyh porod pri droblenii. Avt-t dis. na soisk. uch. st. kand. tehn. nauk.* [Investigation of the regularity of rock breeding during crushing. Avt-t dis. ... Cand. tech. sciences] Moscow, 1968, 24 p. (In Russian)
15. Hoang Chien. *Razrushenie pochvennyh glyb udarom.* Meh. i jelekt. soc. sel'skogo hozjajstva. 1968, № 10, s. 38-39. (In Russian)

Сведения об авторах

Бартенев Иван Михайлович – профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», доктор технических наук, профессор, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: kafedramehaniza@mail.ru

Information about authors

Bartenev Ivan Mikhailovich – Professor of Forestry Mechanization department, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», DSc in Engineering, Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: kafedramehaniza@mail.ru.

DOI: 10.12737/article_5b97a15e077cc5.51055673

УДК 630*4

ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ МАШИНЫ С ГИДРОПРИВОДОМ ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ И ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

доктор технических наук, профессор **И. М. Бартенев**¹

доктор технических наук, профессор **П. И. Попиков**¹

А. В. Шаров¹

Н. А. Шерстюков¹

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация

В данной статье представлена математическая модель работы лесного пожарного грунтомета с гидроприводом, позволяющей изучить влияние параметров гидросистемы лесопожарного грунтомета, грунта и препятствий на эффективность рабочего процесса и защиты ротора. Метод в котором почва и препятствия представляются совокупностью большого количества (порядка 2000...10000) шарообразных элементов малого размера, способных взаимодействовать как между собой, так и с лопатками грунтомета. Дифференциальные уравнения, описывающие движение элементов грунта и препятствий, а также вращение ротора грунтомета, являются однотипными. Для решения системы дифференциальных и алгебраических уравнений, которая заложена в основу модели, разработана компьютерная программа "Программа для моделирования работы лесного пожарного грунтомета с энергосберегающим гидроприводом". Программа разработана в среде BorlandDelphi 7.0 на языке программирования ObjectPascal. Перед началом компьютерного эксперимента можно задать конструктивные и технологические параметры грунтомета и гидросистемы, физико-механические параметры грунта. В процессе работы программа несколько раз в секунду вы-