

УДК 502/504:631.311.5

Ю. П. ЛЕОНТЬЕВ, А. А. МАКАРОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Московский государственный университет природообустройства»

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЫХЛЕНИЯ ГРУНТА И РАСЧЕТ ТЯГОВОГО УСИЛИЯ ОБЪЕМНОГО РЫХЛИТЕЛЯ

*В процессе глубокого рыхления почвы под воздействием рабочего органа происходит разрушение массива грунта, которое сопровождается его подъемом и смещением вперед. На основании анализа кинематических и действующих напряжений на элементарный объем грунта предложен метод расчета тягового усилия с учетом таких составляющих, как резание, трение, преодоление силы тяжести и сил инерции при перемещении грунта.*

*Глубокое рыхление, напряжения сжатия и сдвига, силы резания и трения, тяговое усилие.*

*In the process of soil deep loosening under the action of the operating element there occurs a breakdown of the earth solid mass which is followed by its rise and ante-displacement. On the basis of the analysis of cinematic and working stresses on the elementary soil volume there is proposed a method of the tractive effort calculation taking into consideration such components as cutting, friction, overcoming of gravity force and forces of inertia under soil movement.*

*Deep loosening, stresses of compression and shear, cutting force, friction, tractive effort.*

В процессе механической разработки грунта участвуют два основных элемента: рабочий орган и обрабатываемая среда (грунт). Изучение закономерностей физических процессов, происходящих при взаимодействии рабочего органа с грунтом, является непростой задачей в основном из-за неоднородности грунта и изменчивости его физико-механических характеристик. Среди большого разнообразия расчетных моделей почв наибольшее распространение в научных исследованиях получила модель сплошной среды. В этом случае любой объем, выделенный из массива, имеет такие же физико-механические свойства, как и вся среда. Предполагается, что элементарные объемы равномерно заполняют рассматриваемое пространство.

Рабочий орган рыхлителя можно рассматривать как систему клиновидных режущих элементов, установленных

определенным образом: лемех, расположенный в нижней части рыхлителя, и две наклонные к горизонту боковые стойки, прикрепленные к лемеху. При поступательном перемещении рабочего органа под действием клинообразных режущих элементов массив грунта в зоне рыхления испытывает различные виды деформаций – сжатие, сдвиг, изгиб, кручение, а точнее, сочетание разных видов деформаций. Такое воздействие рабочего органа приводит к разрушению массива грунта, т.е. к рыхлению. При этом происходит увеличение объема грунта и перемещение его частиц в определенном пространстве и направлении, преимущественно вверх и вперед по ходу движения рабочего органа. Величине этих перемещений и траектории частиц должно удовлетворять основное условие – равномерное рыхление, соответствующее агротехническим

требованиям. Такое рыхление и перемещение грунта во многом определяется конструкцией и параметрами рабочего органа. Существенно влияют на этот процесс величины углов резания лемеха и боковых стоек. С увеличением углов резания интенсивность воздействия рабочего органа на массив грунта возрастает, что объясняется увеличением вертикальной составляющей усилия резания. При этом увеличиваются затраты энергии на рыхление и перемещение его в пространстве.

Перемещение массива грунта можно представить в виде движений элементарных объемов, неодинаковых по длине и направлению.

Изменяя параметры движения элементарных объемов за счет углов резания и формы рабочего органа, можно влиять на значения и направление действия элементарных сил сопротивления рыхлению, а в конечном итоге – на реакцию грунта на рабочий орган. При анализе процесса рыхления можно использовать в общем виде математическую модель, отображающую движение элементарных частиц грунта.

Траектория движения частиц почвы  $m$  может быть описана в системе координат в виде «вектор – функции  $\vec{r}(s)$  с параметром  $s$ »:

$$\vec{r}(s) = x(s)\vec{i} + y(s)\vec{j} + z(s)\vec{k},$$

где  $s = f_s(t)$  – дуговая координата отрезка пути, пройденного частицей грунта по рассматриваемой траектории;  $x(s)$ ,  $y(s)$ ,  $z(s)$  – координаты точек исследуемой траектории как функции от пройденного частицей пути этой траектории;  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – единичные векторы перемещений по направлению осей  $x, y, z$ .

Дифференцируя по параметру  $s$  эту зависимость, представляющую закономерность движения частиц, и учитывая, что  $s = f_s(t)$ , получаем закономерность изменения скорости движения частицы грунта от времени  $t$ . Вторая производная по  $s$  представляет закон изменения ускорений, действующих на частицу в любой точке траектории движения.

Совместив частицу с началом естественных координат, можно представить движение частицы обрабатываемого пласта (рис. 1). Векторы  $\vec{\tau}, \vec{n}, \vec{b}$  являются единственными векторами этой системы координат (они используются при кинематическом анализе перемещения частиц грунта).

С помощью векторов  $\vec{\tau}, \vec{n}, \vec{b}$  можно определить положение каждого элементар-

ного клина в пространстве и относительно друг друга, а также ориентацию векторов скорости и ускорения движения частиц грунта. Если траектория является плоской кривой, то, определив угол между соседними участками, можно получить угол второго клина относительно первого [1–3].

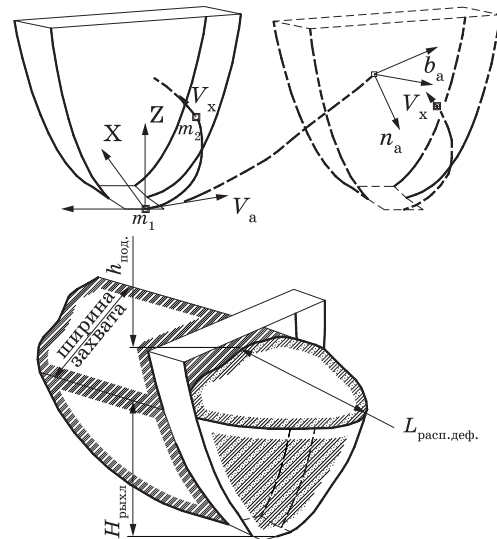


Рис. 1. Схема перемещения элементарной частицы грунта и характер его деформации

В естественной системе координат можно вычислить следующие значения составляющих:  $R_v$  – сопротивление рыхлению, зависящее от изменения скорости движения, веса грунта  $G_r$ , трения  $F_{тр}$ , липкости  $F_n$ , сопротивления сдвигу (сколу)  $R_c$ , силы реакции грунта  $R_r$ , а также от силы подпора и углов положения этих величин относительно нормали к каждому конкретному элементарному участку рабочего органа (см. рис. 1). Длину пути  $S$ , пройденного частицей грунта  $m$  по криволинейной траектории, можно найти, решая интегральное уравнение, связывающее длину, форму траектории и конкретное положение частицы в пространстве:

$$S = \int_0^{x_m} \sqrt{x_m^2 + y_m^2 + z_m^2} dx_m.$$

Длина пути  $S_e$ , пройденная элементарным клином до образования плоскости сдвига,

$$S_e = v_e t k_{yc},$$

где  $v_e$  – переносная скорость движения рабочего органа;  $k_{yc}$  – коэффициент усадки обрабатываемого пласта.

Переходя с одного элемента на другой, частица испытывает дополнительные динамические нагрузки, обусловленные силами инерции и ускорением частиц грунта. Это одна из составляющих силы

реакции, возникающая при рыхлении. Наряду с этим действуют силы сжатия, трения липкости.

Силу сжатия можно определить по формуле

$$F_{сж} = bk_{сж} \int \int L_0 L_a dt,$$

где  $b$  – ширина пласта;  $k_{сж}$  – удельное усилие сжатия элементарного объема;  $L_0$  – длина пути частицы грунта;  $L_a$  – длина траектории абсолютного движения частицы.

Вес пласта грунта, проходящего через рабочий орган,

$$G = \int L_0 dthb\gamma,$$

где  $\gamma$  – плотность грунта, т/м<sup>3</sup>;  $h$  – толщина резания.

Значение силы инерции пласта грунта

$$F_a = a_i \int L_0 dthb\gamma,$$

где  $a_i$  – текущее значение абсолютного ускорения частицы.

Экспериментальными исследованиями авторов моделей рабочих органов получены фактические данные о характере перемещения грунта в процессе глубокого рыхления. Установлено, что верхние слои грунта вначале перемещаются в направлении движения перед рабочим органом, затем поднимаются вверх между боковыми режущими стойками, а затем опускаются вниз, располагаясь относительно ровным слоем.

Характер и величина деформации зависят не только от типа и параметров рабочих органов, но и от физико-механических свойств обрабатываемого грунта (структуры, влажности, механического состава). Под воздействием одного типа рабочего органа грунт в различных состояниях будет по-разному деформироваться. Сжатие грунта при заблокированном резании происходит в условиях невозможности бокового расширения, и грунт оказывает давление на боковые стенки массива. Обозначив приращение сжимающего усилия  $dF$  и приращение бокового давления  $dp$ , можно найти коэффициент бокового давления:

$$\chi = dp / dF.$$

Коэффициенты Пуассона  $\mu$  и бокового давления  $\chi$  связаны зависимостью  $\chi = \mu(1 - \mu)$  или  $\chi = \mu(1 - \mu)$ .

Используя коэффициент Пуассона, можно определить объемную деформацию элемента грунта:

$$\Delta V = \frac{V_1 - V}{V} = \chi(1 - 2\mu),$$

где  $V_1$  и  $V$  – конечный и начальный объемы соот-

ветственно.

Значения коэффициентов  $\chi$  и  $\mu$ : для суглинков –  $\chi = 0,60$ ;  $\mu = 0,35$ ; для глины –  $\chi = 0,70$ ;  $\mu = 0,42$  [4].

При рыхлении происходит пространственное нагружение элемента грунта, находящегося под действием трех взаимно перпендикулярных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  (главные напряжения) (рис. 2). В сечениях, соответствующих главным напряжениям, касательные равны 0.

Деформации по направлению действия главных напряжений  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  определяются по следующим уравнениям [5]:

$$\epsilon_1 = E^{-1} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)];$$

$$\epsilon_2 = E^{-1} [\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)];$$

$$\epsilon_3 = E^{-1} [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)],$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – напряжения на гранях элемента грунта.

Относительная объемная деформация – это сумма главных линейных деформаций:

$$\Delta V = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = E^{-1} (1 - 2\mu)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3).$$

При действии на элемент сплошной среды сжатием или растяжением в его наклонных сечениях возникают напряжения нормальные  $\sigma_a$  и касательные  $\tau_a$ . Величины  $\sigma_a$  и  $\tau_a$  можно определить по следующим формулам:

$$\sigma_a = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha;$$

$$\tau_a = 0,5(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha.$$

Максимальное значение напряжений  $\tau_a$  возникнет при  $\alpha = 45^\circ$ , т.е.

$$\tau_{max} = 0,5(\sigma_1 - \sigma_3).$$

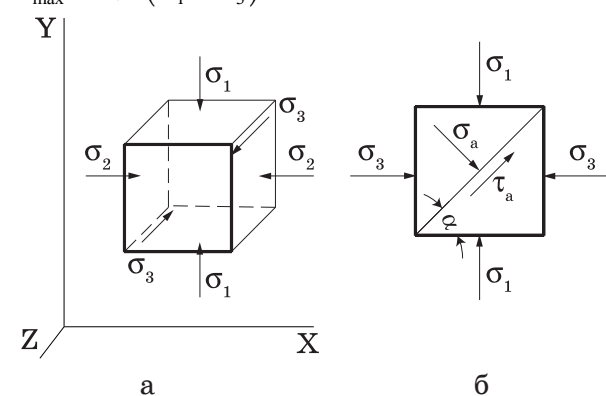


Рис. 2. Схема нагружения элемента грунта; а – трехосное сжатие, б – напряжения, возникающие на наклонной плоскости элемента грунта

Нормальные напряжения на этой плоскости при  $\alpha = 45^\circ$  равны  $\sigma_a = 0,5(\sigma_1 + \sigma_2)$ . Таким образом, основным видом деформации грунта рыхлителем является деформация сжатия. Под действием рабочего

органа грунт вначале сжимается, образуется лидирующая трещина, характеризующая отрыв некоторого объема грунта от массива, после этого развиваются другие виды деформаций: сдвиг, изгиб, растяжение. Внешние нагрузки, приложенные к некоторому элементу грунта, передаются на весь объем, подверженный воздействию рабочего органа.

Использование предельных величин напряжений текучести  $\sigma_T$  и прочности  $\sigma_B$ , полученных для оценки прочности грунта, находящегося в сложном напряженном состоянии, возможно на основании теории прочности. Приемлемой для землеройных рабочих органов можно считать теорию прочности Кулона–Мора о прямой зависимости предельного сопротивления грунта сдвигу от нормальных напряжений [6, 7]. По гипотезе Мора, разрушение начинается тогда, когда напряжение сдвига на произвольной площадке достигает предельного значения, которое является функцией нормального напряжения  $\sigma$  на этой площадке. В общем случае это условие представляется следующим образом:

$$\tau = f(\sigma),$$

где  $f(\sigma)$  – экспериментально определяемая функция.

Подставляя выражения для  $\tau$  и  $\sigma$ , это можно представить так:

$$0,5(\sigma_1 - \sigma_3) = f[0,5(\sigma_1 + \sigma_3)].$$

Для определения вида функции  $\tau = f(\sigma)$  необходимо построить ряд кругов предельных напряжений для различных напряженных состояний материала. На практике для напряженных состояний, изображаемых кругами Мора, огибающую кривую заменяют прямой, касательной к этим кругам. В этом случае предельное состояние аппроксимируется уравнением Кулона–Мора:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi_B,$$

где  $c$  – сцепление,  $\varphi_B$  – угол внутреннего трения.

Тс, для суглинка на глубине 0,25 м: при влажности 13...14 % коэффициент внутреннего трения  $f_B = 0,54$ ;  $c = 0,4$  МПа; при влажности 22...23 %  $f_B = 0,4$ ;  $c = 0,2$  МПа. Сцепление плотных грунтов с нарушенной структурой не превышает 0,7 МПа, в то время как для грунтов с ненарушенной структурой сцепление доходит до 1,0...1,5 МПа, что важно учитывать при глубоком рыхлении. (В реальных условиях при работе рыхлителей происходит более сложный процесс разрушения и перемещения грунта).

Упрощенно объемный рыхлитель можно представить как совокупность простых ножевых элементов. Горизонтальный нож (в дальнейшем – лемех), осуществляющий отрыв всего объема грунта от массива, имеет угол резания  $\alpha$ . Боковые ножи и стойки расположены под углом  $\gamma$  друг к другу, угол резания –  $\beta$ .

По агротехническим требованиям подобный рабочий орган должен рыхлить грунт на всю рабочую глубину и по всей ширине захвата. При этом в грунте должны происходить деформации сдвига, скола или отрыва и выпирания в сторону поверхности массива, а также должно быть обеспечено однородное рыхление.

Процесс рыхления можно представить как воздействие элементов рыхлителя на грунт. Лемех, выдвинутый вперед относительно боковых стоек, при поступательном движении образует лидирующую зону разрушения массива. Боковые стойки, установленные с небольшим уклоном назад относительно вертикали, постепенно входят в процесс разрушения, начиная с места присоединения к лемеху. К началу процесса резания грунт, отделенный лемехом, движется вверх по поверхности лемеха, поднимаясь на некоторую высоту. Боковые стойки, отделяя грунт от массива, перемещают его к оси рабочего органа и вверх. Подъем и перемещение грунта вверх и вперед происходит за счет углов резания лемеха и стоек (рис. 3).

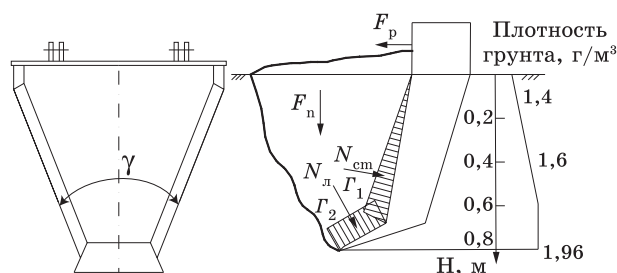


Рис. 3. Схема рабочего органа рыхлителя к расчету усилий

Силу сопротивления рыхлению в целом  $F_T$  можно представить как сумму основных составляющих.

Наибольшую величину имеет усилие резания  $F_p$ . Другие сопротивления: сила трения грунта по стали  $F_{тр1}$ , сила внутреннего трения грунта  $F_{тр2}$ , сопротивление по преодолению веса грунта  $F_{гн}$ , сопротивление на перемещение грунта в горизонтальном направлении  $F_{гр}$  и на

преодоление сил инерции массы грунта  $F_{ин}$ :  
 $F_T = F_p + F_{тр1} + F_{тр2} + F_n + F_{гр} + F_{ин}$ .

Сила резания  $F_p$  складывается из сил резания лемеха  $F_{рл}$  и боковых стоек  $F_{рст}$ :  
 $F_p = F_{рл} + 2F_{рст}$ .

Каждая из этих составляющих на поверхности режущих элементов раскладывается на силу, перпендикулярную плоскости элемента,  $F_n$ , и силу, действующую вдоль плоскости,  $F_n f$ . Сила, действующая вдоль плоскости, является силой трения  $F_{тр}$ , и может быть определена как  $F_{тр} = F_n f$ , где  $f$  – коэффициент трения грунта по стали. Нормальные силы  $F_n$  способствуют подъему и перемещению грунта. При подъеме деформируемого объема грунта нормальные силы преодолевают вес слоя грунта, причем верхняя часть имеет большую ширину и меньшую плотность, а нижняя часть слоя – меньшую ширину, но большую плотность. Таким образом, масса перемещаемого и разрушаемого грунта по мере увеличения глубины уменьшается, а плотность увеличивается.

Усилие резания лемехом  $F_{рл}$  можно определить как сумму горизонтальных составляющих от равнодействующей контактных давлений  $N_n$  и силы трения  $F_{трл}$ :  
 $F_{рл} = N_n \sin \alpha + F_{трл} \cos \alpha$ ,

где  $N_n$  – равнодействующая нормальных контактных давлений, действующих в зоне наибольшей плотности грунта,  $N_n = \sigma_2 A_n$ ,  $\sigma_2$  – нормальные контактные давления на поверхности лемеха;  $A_n$  – площадь рабочей поверхности лемеха.

Сила трения грунта о лемех

$F_{трл} = N_n f$ ,  
 где  $f$  – коэффициент трения грунта по стали,  $f = 0,65 - 0,2$ , уменьшается с увеличением нормальных от 0,1 до 0,8 МПа.

Усилие резания боковой стойкой определяется так же, как и для лемеха:

$$F_{рст} = N_{ст} \sin \beta + F_{ст} \cos \beta.$$

Равнодействующая контактных давлений в этом случае определяется так:

$$N_{ст} = \sigma_{1ср} A_{ст},$$

где  $\sigma_{1ср}$  – среднее нормальное давления на поверхности стойки, которое можно определить по центру треугольника эпюры давления, так как на дневной поверхности  $\sigma = 0$  (с увеличением глубины давление увеличивается и на глубине установки лемеха оно становится равным  $\sigma_2$ );  $A_{ст}$  – площадь рабочей поверхности стойки.

Нормальные контактные давления можно определить по формуле, предложенной Н. Н. Масловым [7]. Эта формула учитывает влияние физического состояния грунта и его механических свойств

на разрушающее воздействие:

$$\sigma = \left[ \frac{h_i \rho}{\text{tg}^4(45 - 0,5\varphi_b)} + \rho b \frac{1 - \text{tg}^4(45 - 0,5\varphi_b)}{\text{tg}^2(45 - 0,5\varphi_b)} + 2c_0 \frac{1 - \text{tg}^2(45 - 0,5\varphi_b)}{\text{tg}^3(45 - 0,5\varphi_b)} \right] g,$$

где  $h_i$  – глубина центра тяжести деформируемого слоя грунта;  $\rho$  – средняя плотность грунта;  $\varphi_b$  – угол внутреннего трения грунта;  $c_0$  – общее сцепление грунта;  $b$  – ширина ножа;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

Экспериментальные исследования авторов позволили в первом приближении определить объем деформируемого грунта перед рабочим органом. При рыхлении перед рабочим органом образуется область деформируемого грунта, которая распространяется впереди на расстояние несколько большее, чем глубина рыхления  $H_{рыхл}$ . Наибольшая высота слоя возле рабочего органа  $(0,25...0,3)H_{рыхл}$  по мере удаления от рабочего органа уменьшается. Полагая, что деформация распространяется от лемеха вперед и вверх, можно представить объем перемещаемого грунта  $V_r$  в виде пирамиды неправильной формы (см. рис. 1).

Сопротивление от силы тяжести поднимаемого грунта  $F_n$ , Н:

$$F_n = V_r \gamma_r,$$

где  $V_r$  – объем поднимаемого грунта, м<sup>3</sup>;  $\gamma_r$  – объемный вес, т/м<sup>3</sup>.

Сопротивление перемещению грунта  $F_{гр}$ , Н:

$$F_{гр} = V_r \gamma_r f_b,$$

где  $f_b$  – коэффициент трения грунта по грунту;  $f_b = 0,3...0,5$ .

Сопротивление трения грунта по грунту  $F_{тр2}$ , Н:

$$F_{тр2} = x V_r \gamma_r,$$

где  $x = \sin \varphi_r / 2$ ;  $\varphi_b$  – угол трения грунта (для глины  $\varphi_b = 14...19^\circ$ ,  $x = 0,24...0,31$ ; для суглинка  $\varphi_b = 24...30^\circ$ ,  $x = 0,37...0,44$  [8]).

Сопротивление от сил инерции  $F_{ин}$ , Н:

$$F_{ин} = m a = V_r \rho a,$$

где  $m$  – масса перемещаемого грунта;  $\rho$  – плотность грунта, т/м<sup>3</sup>;  $a$  – ускорение, м/с<sup>2</sup>.

### Выводы

В процессе рыхления на режущих элементах рабочего органа возникают вертикальные составляющие усилия резания, способствующие подъему и разрушению грунта, величина которых зависит от углов резания.

Характер деформации грунта зависит от параметров рабочего органа рыхлителя, глубины рыхления, влажности и плотности грунта.

Предложенный метод расчета тягового усилия учитывает основные факторы процесса рыхления грунта, однако требует экспериментальной проверки.

1. Принципы формирования и структура математической модели обоснования конструктивно-технологических параметров рабочих органов глубокого рыхления почвы / А. С. Путрин [и др.]: Труды сотрудников и преподавателей факультета механизации сельского хозяйства. – Оренбург: Изд-во ОГАУ, 1999. – Т. 3. – С. 51–54.

2. Кленин Н. И., Сақун В. А. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. – М.: Колос, 1980. – 582 с.

3. Сабликков М. В. Сельскохозяйственные машины. Основы теории и технологического расчета. – М.: Колос, 1968. – 295 с.

4. Бабков В. Ф., Безрук В. М. Основы грунтоведения и механики грунтов. – М.:

Высшая школа, 1976. – 285 с.

5. Месчан С. Р. Начальная и длительная прочность глинистых грунтов. – М.: Недра, 1978. – 207 с.

6. Зеленин А. Н., Баловнев В. И., Керов И. П. Машины для земляных работ. – М.: Машиностроение, 1975. – 422 с.

7. Маслов Н. Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1982. – 511 с.

8. Дорожные машины / Т. В. Алексеева [и др.]. – М.: Машиностроение, 1972. – Ч. 1. – 504 с.

Материал поступил в редакцию 29.04.11.

*Леонтьев Юрий Петрович, кандидат технических наук, профессор кафедры «Мелиоративные и строительные машины»*  
Тел. 8 (499) 976-45-13,

*Макаров Александр Алексеевич, аспирант*

Тел. 8 (499) 900-60-26, 8 (909) 972-69-41

УДК 502/504:620.9

**С. А. АНДРЕЕВ, А. В. ВАГИН**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина»

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ С УЧЕТОМ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

*Отмечен повышенный интерес мировой общественности к освоению новых энергетических источников. Проанализирован теоретический подход к оценке эффективности энергетических источников на основе векторного произведения плотности энергии на скорость ее распространения в упругой среде. Показана целесообразность и представлена методика практической оценки эффективности с учетом величины пространства, занимаемого соответствующим преобразователем, а также окружающего пространства, где размещение аналогичных преобразователей недопустимо.*

*Энергетические источники, оценка эффективности, плотность потока энергии, коэффициент полезного действия, преобразователи энергии.*

*There is mentioned an increased interest of the world public to the development of new energy sources. The theoretical approach to the efficiency assessment of energy sources is analyzed on the basis of a vector product of the energy density by its spreading speed in the elastic medium. There is shown a feasibility and given a method of practical assessment of the efficiency taking into account a workspace size occupied by the appropriate converter as well as the environment where the placement of analogical converters is not permissible.*

*Energy sources, assessment of efficiency, density of energy flux, efficiency of energy converters.*