

УДК 631.412

DOI 10.22314.2073-7599-2016.5.17-23

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ РЫХЛИТЕЛЬНОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА

Лобачевский Я.П.¹, докт. техн. наук, профессор; Старовойтов С.И.^{2*}, канд. техн. наук

¹Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 1-й Институтский проезд, 5, Москва, 109428, Российская Федерация

²Брянский государственный аграрный университет, ул. Советская, 2а, с. Кокино, Выгоничский район, Брянская обл., 243365, Российская Федерация, *e-mail: starovoitov.si@mail.ru

При работе почвообрабатывающего рабочего органа важно управлять качеством обработки деформируемого слоя почвы. Почва как объект обработки характеризуется модулем упругости первого рода, коэффициентом Пуассона, пределом прочности на сжатие, углами внешнего и внутреннего трения, коэффициентом удельной потенциальной энергии разрушения почвенных частиц. Все перечисленные показатели зависят от значений абсолютной влажности суглинистой почвы. С помощью метода конечных элементов спрогнозировали напряженно-деформируемое состояние обрабатываемого слоя суглинистой почвы с учетом таких допущений, как квазисплошность, квазиупругость, постоянство скорости и глубины обработки. Показали, что реализацией данного метода стали составление глобальной матрицы жесткости, грузового столбца, решение системы линейных уравнений, определение возможных перемещений узловых точек почвенного массива по горизонтали и вертикали, а также определение удельной потенциальной энергии элементарных почвенных фрагментов. Определили, что грузовой столбец формируется с учетом силы тяжести почвенных фрагментов, тягового сопротивления боковой поверхности долотообразной лапы и режущей кромки, а также сил инерции. Сопоставив полученные значения с экспериментальной величиной удельной потенциальной энергии разрушения почвенных фрагментов суглинистой почвы, можно сделать прогноз о геометрических параметрах зоны разрушения и степени крошения почвенных фрагментов. Так, при абсолютной влажности суглинистой почвы 20,73 процента, скорости движения 1,6 м в секунду, глубине обработки 0,2 м, ширине рабочего органа 0,02 м длина зоны разрушения в направлении движения составляет 0,12 м, ширина – 0,1 м, критическая глубина резания – 0,08 м. Коэффициент крошения зоны возмущенного состояния не превышает 22 процента.

Ключевые слова: обработка почвы, долотообразная лапа, матрица жесткости, режущая кромка, тяговое сопротивление, коэффициент крошения, критическая глубина резания. DOI 10.22314.2073-7599-2016.5.17-23

■ **Для цитирования:** Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И. Теоретические и технологические аспекты работы рыхлительного рабочего органа // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. №5. С. 17-23.

THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF RIPPER WORKING TOOLS OPERATION

Ya.P. Lobachevskiy¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor;

S.I. Starovoytov^{2*}, Cand. Sci. (Eng.)

¹All - Russia Research Institute of Mechanization for Agriculture, 1st Institutskiy proezd, 5, Moscow, 109428, Russian Federation, e-mail: vim@vim.ru

²Bryansk State Agrarian University, Sovetskaya St., 2a, vil. Kokino, Vygonichi district, Bryansk region, 142660, Russian Federation, *e-mail: starovoitov.si@mail.ru

Operating of quality of cultivation of a deformable soil layer is important at soil cultivating working too use. The soil as cultivated object is characterized by elastic modulus, the Poisson ratio, ultimate compression strength, angle of wall and internal friction, coefficient of specific potential energy of destruction of soil particles. All these indicators depend on values of absolute humidity of the loamy soil. By means of a finite elements method the authors predicted an intense and deformable condition of the cultivated layer of the loamy soil taking into account such suppositions as a quasi solidity, quasi elasticity, constancy of speed and depth of cultivation. For realization of this method several operations were used, such as compiling of a global stiffness matrix, a load column, solve simultaneous linear equations, definition of possible movements of nodal points in the soil body across and verticals, and also determination of specific potential energy of elementary soil fragments. The load column is formed taking into account the gravity of soil fragments, traction resistance of a side surface of a chisel and a cutting edge, and also inertia forces. In case of comparison of the received values with

the experimental rate of specific potential energy of destruction of soil fragments of the loamy soil it is possible to make the forecast about geometrical parameters of a destruction zone and extent of crumbling of soil fragments. So, at absolute humidity of the loamy soil 20.73 percent, speed of the movement of 1.6 m a second, depth of processing of 0.2 m, width of working tool of 0.02 m destruction zone length in the direction of the movement makes 0.12 m, width equals 0.1 m, the critical depth of cutting is 0.08 m. The coefficient of crumbling of a zone of the disturbed state does not exceed 22 percent.

Keywords: Soil cultivation; Chisel; Global stiffness matrix; Blade; Traction resistance; Crumbling coefficient; Critical depth of cutting; Absolute humidity. DOI 10.22314.2073-7599-2016.5.17-23

For citation: Lobachevskiy Ya.P., Starovoytov S.I. Theoretical and technological aspects of ripper working tools operation. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2016; 5: 17-23. (In Russian)

Один из важнейших показателей, оценивающих качество взаимодействия рабочего органа с почвой, – коэффициент крошения [1]. Известны регрессионные модели, связывающие коэффициент крошения почвы, ее абсолютную влажность и скорость движения почвообрабатывающего орудия [2]. Существуют теоретические наработки в области определения геометрических параметров зоны разрушения, состоящей из участков внедрения и возмущенного состояния, например критической глубины резания [3-5]. Тем не менее, актуальной остается разработка теоретических основ напряженно-деформированного состояния, связывающих геометрию зоны разрушения, коэффициент крошения почвы определенного гранулометрического состава и ее абсолютную влажность [6].

Цель исследований – определение геометрических параметров зоны разрушения и коэффициента крошения при взаимодействии долотообразной лапы с почвой с помощью метода конечных элементов.

Материалы и методы. Для реализации метода конечных элементов следует составить глобальную матрицу жесткости и грузового столбца, решить систему линейных уравнений, определить возможные перемещения узловых точек почвенного массива по горизонтали и вертикали и рассчитать удельную потенциальную энергию элементарного почвенного фрагмента [7, 8]. Грузовой столбец формируется с учетом силы тяжести почвенных фрагментов, тягового сопротивления боковой поверхности долотообразной лапы, режущей кромки, преодоления сил инерции при постоянстве скорости движения и глубины обработки [9-13].

С учетом таких допущений, как квазисплошность и квазиупругость, почва как объект обработки характеризуется модулем упругости первого рода, коэффициентом Пуассона, пределом прочности на сжатие, углами внешнего и внутреннего трения, коэффициентом удельной потенциальной энергии разрушения почвенных частиц [14-16]. Все перечисленные показатели зависят от значений абсолютной влажности суглинистой почвы.

Введем систему координат YOX , вычертим профиль долотообразной лапы, определим число элементарных составляющих почвенного массива (рис. 1). Нагрузка приходится на одну из сторон треугольников 2; 4; 6; 8; 9. В скобках обозначены номера элементарных составляющих. Выделены и обозначены 49 узловых точек. Под действием рассредоточенной нагрузки узловые точки смещаются. Обозначим символом u_i горизонтальное смещение в направлении оси X , символом v_j – вертикальное перемещение в направлении оси Y .

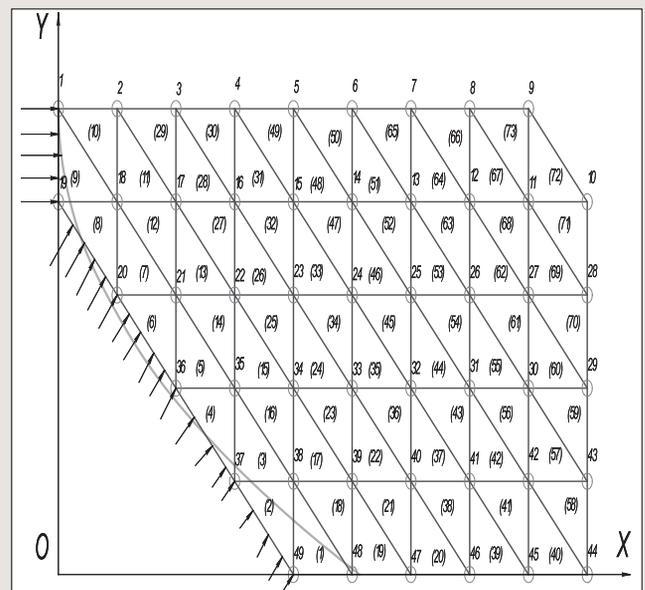


Рис. 1. Составляющие почвенного массива

Fig. 1. Components of soil body

Перемещения всех узловых точек почвенного пласта определяются вектором:

$$\bar{Z} = [u_1, v_1, \dots, u_{49}, v_{49}]^T. \quad (1)$$

Глобальная матрица жесткости, перемещения всех узловых точек почвенного массива и внешняя нагрузка отражены в следующем уравнении:

$$A \cdot B^{-1} \cdot A^T \cdot \bar{z} = \bar{P}, \quad (2)$$

где $A \cdot B^{-1} \cdot A^T$ – матрица жесткости почвенного мас-



сива;

\bar{z} – вектор-столбец перемещений всех узловых точек;

\bar{P} – вектор-столбец внешней нагрузки.

Для формирования глобальной матрицы использовали таблицы перемещения узловых точек эле-

Узловые точки Nodal points		u_2	u_3	v_3
38(3)	u_{38} 74	0	1	0
	v_{38} 75	0	0	1
48(2)	u_{19} 94	1	0	0
	v_{19} 95	0	1	0
49(1)	u_{20} 38	-1	-1	0
	v_{20} 39	0	-1	-1

ментарных фрагментов. Для их заполнения необходимо иметь нумерацию узловых точек всего почвенного массива, нумерацию треугольников, треугольник с местной нумерацией. В таблице 1 представлены перемещения узловых точек элемента 1 (S1).

Таблица 1 включает пять столбцов. Первый столбец содержит номера узловых точек почвенного массива, а цифрой в скобках обозначены узлы элементарного почвенного фрагмента в местной нумерации. Второй столбец обозначает перемещение по горизонтали и вертикали узловых точек. А цифры справа характеризуют номер строки для формирования глобальной матрицы с учетом того, что первая строка в программе LabVIEW обозначена «0». Третий, четвертый и пятый столбцы содержат фрагменты элементарной матрицы a , связывающей независимые силы со всеми силами, действующими на элементарный почвенный фрагмент.

Вектор-столбец внешней нагрузки (грузовой столбец) представленного почвенного массива включает 98 строк. Эта величина равна произведению количества узловых точек на два вида перемещения: по горизонтали и вертикали. Узловые точки нагружены силой тяжести, силой инерции, составляющими нагрузки от взаимодействия долотообразной лапы с почвенным массивом.

Сила тяжести G приложена по вертикали ко всем узловым точкам. В грузовой столбце данная величина отрицательная.

$$G = \frac{1}{2} \cdot a \cdot b \cdot \delta \cdot \rho \cdot g, \quad (3)$$

где a, b – размеры треугольного элемента, формирующего почвенный массив;

δ – толщина рабочего органа;

ρ – плотность деформируемой почвы;

g – ускорение свободного падения.

Силу инерции $P_{ин}$ определим по следующей формуле:

$$P_{ин} = \frac{V \cdot v \cdot \sqrt{E \cdot \rho}}{\pi \cdot l}, \quad (4)$$

где V – объем почвенного массива, m^3 ;

v – скорость движения долотообразной лапы, m/c ;

E – модуль упругости почвы, H/m^2 ;

l – длина тела скольжения, m .

Угол скалывания ψ равен:

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \frac{\varphi_{внеш} + \varphi_{внут} + \alpha}{2}, \quad (5)$$

где $\varphi_{внеш}$ – угол внешнего трения почвы, рад.;

$\varphi_{внут}$ – угол внутреннего трения почвы, рад.;

α – угол резания долотообразной лапы, рад.

Длину l тела скольжения вычислим по формуле:

$$l = \frac{H}{\sin \psi}, \quad (6)$$

где H – глубина обработки, m .

Найдем тяговое усилие от лезвия долотообразной лапы:

$$P_{рк} = \delta \cdot t \cdot \left[\frac{E \cdot v}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} + \frac{2 \cdot \eta \cdot v \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\varphi_{внеш} + \varphi_{внут} + \alpha}{2} \right)}{\pi \cdot P} \right], \quad (7)$$

где t – толщина режущей кромки долотообразной лапы, m ;

η – коэффициент динамической вязкости суглинистой почвы, $Pa \cdot c$.

Данную величину прикладываем по горизонтали к 49-й узловой точке.

Тяговое усилие поверхности долотообразной лапы $P_{пов}$ определим с помощью выражения:

$$P_{пов} = - \frac{\sigma_{сж} \cdot H \cdot \delta \cdot [f_{внеш} \cdot (a_1 x_0^2 + b_1 x_0) + x_0]}{\Delta}, \quad (8)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности почвы на сжатие, Pa ;

$f_{внеш}$ – коэффициент внешнего трения почвы;

x_0 – горизонтальная координата верхней точки долотообразной лапы, m ;

a_1 и b_1 – коэффициенты бокового профиля долотообразной лапы, m^{-1} ($a_1 = -5,13$; $b_1 = 2,08$);

Δ – единичное перемещение рабочего органа, m ;

$$b_1 = \frac{y_0}{x_0} - a_1 \cdot x_0, \quad (9)$$

где y_0 – вертикальная координата верхней точки долотообразной лапы, m ;

Значение H соответствует координате x_0 . Значение $\sigma_{сж}$ представляет собой предел прочности суглинистой почвы на сжатие. Это допустимо, так как существует зона внедрения и зона возмущен-

ного состояния. Для пассивного рабочего органа, в частности долотообразной лапы, формирование зоны внедрения будет сопровождаться перемещением почвенных комков в сторону дневной поверхности (в сторону от хода движения при их вдавливании в стенки почвенного пласта) или их разрушением. Исходные данные к оценке степени кро-

Table 2		Таблица 2
Исходные данные к оценке степени крошения пласта		
BASIC DATA FOR ASSESSMENT OF FURROW SLICE CRUMBLING RATE		
Показатели Parameters	Обозначение Notation	Величина Value
Высота треугольного элемента, м Triangular element height, m	a	0,04
Ширина треугольного элемента, м Triangular element width, m	b	0,04
Плотность почвы ρ кг/м ³ Soil density, kg/m ³	ρ	1554
Скорость движения долотообразной лапы, м/с Chisel movement speed, m/s	v	1,6
Модуль упругости первого рода, Па Elastic modulus, Pa	E	3167531
Объем почвенного массива, м ³ Soil body volume, m ³	V	0,0012
Коэффициент динамической вязкости, Па·с Coefficient of dynamic viscosity, Pa·s	η	3428703
Длина тела скольжения, м Sliding body length, m	l	0,27
Число элементов почвенного массива Number of soil body elements	n	73
Угол внешнего трения почвы, рад Angle of wall friction, rad	$\varphi_{\text{внеш}}$	0,539
Угол внутреннего трения почвы, рад Angle of internal friction, rad	$\varphi_{\text{внут}}$	0,506
Угол резания долотообразной лапы, рад Chisel cuttig angle, rad	α	0,46
Толщина режущей кромки, м Cutting edge width, m	t	0,001
Ширина рабочего органа, м Working tool width, m	δ	0,02
Предел прочности почвы на сжатие, Па Soil ultimate compression strength, Pa	$\sigma_{\text{сж}}$	154175
Горизонтальная координата верхней точки долотообразной лапы, м Horizontal coordinate of chisel top point, m	x_0	0,2
Вертикальная координата верхней точки долотообразной лапы, м Vertical coordinate of chisel top point, m	y_0	0,205

Table 3		Таблица 3
РАСЧЕТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИН ТЯГОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ		ESTIMATED VALUES OF TRACTIVE RESISTANCE COMPONENTS
Показатели Parameters	Величина Value	
Сила тяжести, Н Gravity force, N	0,24	
Сила инерции, Н Inertial force, N	156	
Тяговое усилие лезвия, Н Cutting edge pulling force, N	257	
Тяговое усилие поверхности, Н Surface pulling force, N	199	

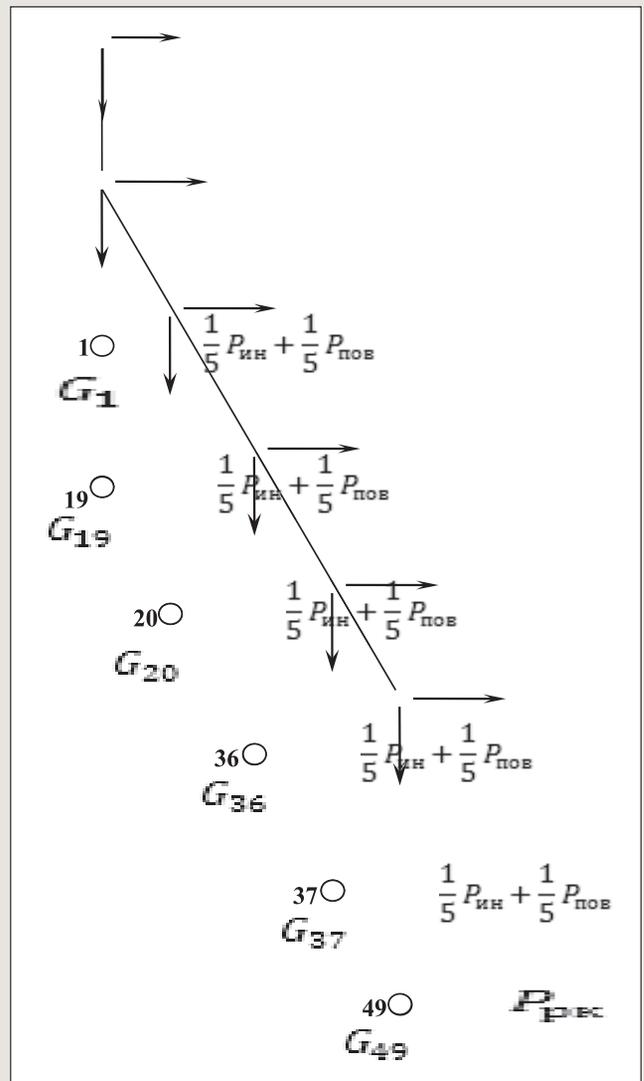


Рис. 2. Силовое воздействие на узловые точки почвенного массива

Fig. 2. Force action on the soil body nodal points

шения пласта и расчетные величины тяговых сопротивлений представлены в таблицах 2 и 3. Силу инерции и тяговое усилие поверхности прикладываем к узловым точкам: 1, 19, 20, 36, 37.

На рисунке 2 представлено силовое воздействие на узловые точки почвенного массива.



Фрагменты грузового столбца с нагрузкой, приложенной в узловых точках 1, 19, 20, 36, 37, 49, представлены в таблице 4. В матрицу жесткости входит глобальная матрица B^{-1} , которая в силу своей симметричности имеет вид:

$$B^{-1} = \frac{E \cdot \delta}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \times \begin{bmatrix} b_1^{-1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & b_n^{-1} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

В данной матрице n обозначает число элементов исследуемого массива. Для нашего случая $n=73$. Решение системы алгебраических уравнений в программе *LabVIEW* дает возможность определить перемещения u_i и v_i каждой из 49 узловых точек.

Удельная потенциальная энергия почвенного фрагмента равна:

$$u = \frac{\Pi}{V}, \quad (11)$$

где Π – потенциальная энергия деформируемого элемента, Дж;

V – объем элементарного почвенного фрагмента.

Потенциальную энергию деформируемого элемента вычисляем по формуле:

$$\Pi = \frac{1}{2} \cdot z^T \cdot r \cdot z, \quad (12)$$

где z, z^T – перемещения узловых точек;

r – матрица жесткости почвенного фрагмента:

$$r = a \cdot b^{-1} \cdot a^T, \quad (13)$$

где a – промежуточная матрица, связывающая независимые силы со всеми силами, действующими на элементарный почвенный фрагмент;

b^{-1} – промежуточная матрица, связывающая независимые силы и перемещения от независимых сил;

a^T – промежуточная матрица, связывающая перемещения от независимых сил и перемещения от всех сил, действующих на элементарный почвенный фрагмент.

На рисунке 3 заштрихованы области элементарных почвенных фрагментов, в которых величина удельной потенциальной энергии разрушения для суглинистой почвы превы-

Table 4		Таблица 4
ФРАГМЕНТЫ ГРУЗОВОГО СТОЛБЦА В УЗЛОВЫХ ТОЧКАХ		LOAD COLUMN FRAGMENTS IN THE NODAL POINTS
Узловые точки	Nodal points	Нагрузка узловых точек, Н
		Nodal points load, N
1		71
		-0,24
19		71
		-0,24
20		71
		-0,24
36		71
		-0,24
37		71
		-0,24
49		257
		-0,24



Рис. 3. Области возможного разрушения деформируемого слоя
Fig. 3. Zones of eventual crushing of deformed layer

шает 7622 Н/м² при абсолютной влажности – 20,73%.

Выделяются три характерных участка напряженно-деформированного состояния: нижний, средний, верхний. В нижнем участке происходит разрушение почвенных комков вследствие их вдавливания в стенку пласта, так как режущая кромка долотообразной лапы работает в условиях заблокированного резания. Средний участок будет отправной точкой формирования критической глубины резания. Для двух слоев верхнего участка разрушение комков будет протекать в условиях полублокированного резания с их выдавливанием на дневную поверхность поля.

Величина удельной потенциальной энергии почвенных фрагментов 1 и 2 верхнего участка в зоне возмущенного состояния будет соответствовать величине удельной потенциальной энергии почвенных фрагментов по ходу движения в зоне внедрения.

С учетом этого для верхнего участка длина зоны разрушения по ходу движения составила $L_1=0,12$ м. Ширина зоны разрушения $L_2=0,1$ м. Критическая глубина резания $L_3=0,08$ м.

Коэффициент крошения пласта K_p равен:

$$K_p = \frac{K_{pi} \cdot n_i}{N}, \quad (14)$$

где K_{pi} – коэффициент крошения при определенной величине потенциальной энергии, накопленной элементарным фрагментом, %;

n_i – число элементарных фрагментов, соответствующих этой накопленной потенциальной энергии;

N – число элементарных фрагментов среднего и

верхнего участка взаимодействия.

При влажности 22,07% и величине удельной потенциальной энергии 13720 Н/м² коэффициент крошения составил 22%, а при влажности 18,04% и величине удельной потенциальной энергии 13720 Н/м² его значение равно 23%. Анализируя величину удельной потенциальной энергии почвенных фрагментов второго слоя верхнего участка, можно заметить, что только два элемента под №13 будут разрушены. Коэффициент крошения будет находиться в пределах 22%. При исследовании состояния первого слоя верхнего участка приходим к выводу о возможном разрушении 12 элементарных почвенных фрагментов. Два фрагмента накопят удельную потенциальную энергию 19112 Па. И для первого слоя коэффициент крошения будет составлять 22%. Таким образом, коэффициент рыхления зоны возмущенного состояния не превысит 22%.

Выводы

1. Разработана методика расчета величины удельной потенциальной энергии деформируемых почвенных фрагментов, позволяющая с помощью экспериментально полученных значений указанной величины прогнозировать такие показатели качества, как геометрические параметры зоны разрушения и показатель крошения.

2. Для верхнего участка длина зоны разрушения по ходу движения составила $L_1=0,12$ м. Ширина зоны разрушения $L_2=0,1$ м. Критическая глубина резания $L_3=0,08$ м. Коэффициент рыхления зоны возмущенного состояния не превысит 22%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Макарец И.К. Степень крошения почвы при обработке // Земледелие. 1985. №5. С. 23-24.
- Саакян Д.Н. Система показателей комплексной оценки мобильных агрегатов. М.: Агропромиздат, 1988. 144 с.
- Лобачевский Я.П. Прочностные и деформационные свойства связанных задерненных почв // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2011. №3. С. 18-20.
- Chi L., Krushwaha R.L. Three dimensional non-linear finite element analysis of soil failure under a simple narrow tillage tool. St. Joseph, Mich., 1987: 27.
- Stafford J.V. Sensing soil failure under for dynamic implement control. St. Joseph, Mich., 1986: 17.
- Добротворский, И.В. Описание поведения почвы под нагрузкой с помощью метода конечных элементов // Научно-технический бюллетень ВАСХНИЛ СО. 1984. Вып. 38. С. 18-24.
- Swick W.C., Perumpral J.V. A model for predicting soil-tool interaction. Journal of Terramechanics. 1988. Vol. 25; 1: 43-56.
- Старовойтов, С.И., Старовойтова Н.П., Блохин В.Н., Чемисов Н.Н. К условию начала процесса крошения пласта при содержании почвы под черным паром // Плодоводство и ягодоводство России. 2012. Т. 29, Ч. 2. С. 171-177.
- Лобачевский Я.П., Эльшеих А.Х. Обоснование расстановки дисковых рабочих органов в комбинированных почвообрабатывающих агрегатах // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2009. №4. С. 22-25.
- Измайлов А.Ю., Сидоров С.А., Лобачевский Я.П., Хорошенков В.К., Кузнецов П.А., Юрков М.А., Голосиенко С.А. Научные принципы повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающей техники // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2012. №3. С. 5-7.
- Лобачевский Я.П. Новые почвообрабатывающие технологии и технические средства // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2000. №8. С. 30-32.
- Лобачевский Я.П. Современные почвообрабатывающие технологии. М.: МГАУ, 1999. 40 с.
- Старовойтов С.И., Комогорцев В.Ф. Обоснование передней поверхности рабочего органа чизельного культиватора // Достижения науки и передовой опыт в производстве и учебно-воспитательный процесс: Материалы научно-технической конференции студентов, преподавателей и сотрудников МГАУ. 2012. С. 10-12.



давателей и аспирантов Брянской ГСХА. Брянск: Брянская ГСХА, 1996. С. 35-37.

14. Старовойтов С.И., Чемисов Н.Н. К определению модуля упругости первого рода // Вестник МГАУ имени В.П. Горячкина. 2011. N1. С. 39-40.

15. Старовойтов С.И., Чемисов Н.Н. К определению коэффициента Пуассона среднесуглинистой почвы // Инновационные процессы в АПК: Сборник научных статей IV Международной научно-практической конферен-

ции преподавателей, молодых ученых, аспирантов и студентов. М.: РУДН, 2012. С. 280.

16. Старовойтов С.И., Старвойтова Н.П., Чемисов Н.Н. К определению предела прочности среднесуглинистой почвы при сжатии // Молодежь и инновации: Материалы Международной научно-практической конференции. Республика Беларусь, Горки: Белорусская ГСХА. 2011. С. 20.

REFERENCES

1. Makarets I.K. Soil crumbling rate at cultivation. *Zemledelie*. 1985; 5: 23-24. (In Russian)

2. Saakyan D.N. Sistema pokazateley kompleksnoy otsenki mobil'nykh agregatov [System of indicators for complex assessment of mobile units]. Moscow: Agropromizdat, 1988: 144. (In Russian)

3. Lobachevskiy Ya.P. Strength and deformation properties of grassed soils. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2011; 3: 18-20. (In Russian)

4. Chi L., Krushwaha R.L. Three dimensional non-linear finite element analysis of soil failure under a simple narrow tillage tool. St. Joseph, Mich., 1987: 27. (In English)

5. Stafford J.V. Sensing soil failure under dynamic implement control. St. Joseph, Mich., 1986: 17. (In English)

6. Dobrotvorskiy I.V. Description of soil behavior at loading by means of method of final elements. *Nauchno-tekhnicheskiiy byulleten' VASKhNIL SO*. 1984; 38: 18-24. (In Russian)

7. Swick W.C., Perumpral J.V. A model for predicting soil-tool interaction. *Journal of Terramechanics*. 1988. Vol. 25; 1: 43-56. (In English)

8. Starovoytov, S.I., Starovoytova N.P., Blokhin V.N., Chemisov N.N. To a condition of beginning of process of soil layer crumbling at clean cultivation. *Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii*. 2012. Vol. 29; 2: 171-177. (In Russian)

9. Lobachevskiy Ya.P., El'sheikh A.Kh. Justification of placement of disk working tools in combined soil-cultivating units. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2009; 4: 22-25. (In Russian)

10. Izmaylov A.Yu., Sidorov S.A., Lobachevskiy Ya.P., Khoroshenkov V.K., Kuznetsov P.A., Yurkov M.A., Golosienko S.A. Scientific principles of increase of wear resistance of working tools of soil-cultivating machinery. *Vestnik*

rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki. 2012. N3. S. 5-7. (In Russian)

11. Lobachevskiy Ya.P. New soil-cultivating technologies and technical means. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2000. N8. S. 30-32. (In Russian)

12. Lobachevskiy Ya.P. Sovremennyye pochvoobrabatyvayushchie tekhnologii [Modern soil-cultivating technologies]. Moscow: MGAU, 1999: 40. (In Russian)

13. Starovoytov S.I., Komogortsev V.F. Obosnovanie peredney poverkhnosti rabocheho organa chizel'nogo kul'tivatora [Justification of a forward surface of working element of chisel cultivator]. *Dostizheniya nauki i peredovoy opyt v proizvodstvo i uchebno-vospitatel'nyy protsess: Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, prepodavateley i aspirantov Bryanskoy GSKhA*. Bryansk: Bryanskaya GSKhA, 1996: 35. (In Russian)

14. Starovoytov S.I., Chemisov N.N. K opredeleniyu modulya uprugosti pervogo roda // *Vestnik MGAU imeni V.P. Goryachkina*. 2011. N1. S. 39-40. (In Russian)

15. Starovoytov, S.I., Chemisov N.N. K opredeleniyu koeffitsienta Puassona srednesuglinistoy pochvy [Revisiting determination of Poisson ratio of average loamly soil]. *Innovatsionnye protsessy v APK: Sbornik nauchnykh statey IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii prepodavateley, molodykh uchenykh, aspirantov i studentov*. Moscow: RUDN, 2012: 280. (In Russian)

16. Starovoytov S.I., Starovoytova N.P., Chemisov N.N. K opredeleniyu predela prochnosti srednesuglinistoy pochvy pri szhatii [Revisiting determination of strength of average soil at compression]. *Molodezh' i innovatsii: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Republic of Belarus, Gorki: Belorusskaya GSKhA. 2011: 20. (In Russian)

Критерии авторства. Все авторы несут ответственность за представленные в статье сведения и плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution. The authors are responsible for information and plagiarism avoiding.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.