

Математическая модель для определения конструктивной массы почвообрабатывающего орудия

Алексей Иванович Дерепаскин¹,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: celinnii@mail.ru;

Антон Николаевич Куваев²,
докторант, e-mail: kuvaevanthon@yandex.ru;
Иван Владимирович Токарев¹,
научный сотрудник, e-mail: Tokarev_Ivan.V@mail.ru

¹Костанайский филиал Научно-производственного центра агроинженерии, г. Костанай, Республика Казахстан;

²Костанайский региональный университет имени А. Байтурсынова, г. Костанай, Республика Казахстан

Реферат. Показали, что удельная конструктивная масса почвообрабатывающего орудия влияет на ширину захвата и заглубляющую способность. Отметим, что для улучшения производительности и экономической эффективности предпочтительно минимизировать этот показатель до определенной величины, чтобы обеспечить заглубляющую способность. Приняли во внимание зависимость от фактического количества рабочих органов и рамных элементов, приходящихся на единицу ширины захвата. (*Цель исследований*) Разработать математическую модель для определения минимально допустимой и фактической удельной конструктивной массы в зависимости от условий эксплуатации почвообрабатывающего орудия и его конструктивно-технологической схемы. (*Материалы и методы*) Использовали математическое моделирование, абстрагирование, анализ, синтез, положения классической механики. (*Результаты и обсуждение*) Разработали математическую модель для нахождения минимально допустимой и фактической удельной конструктивной массы, которая учитывает физико-механические характеристики обрабатываемой почвы, количество рабочих органов и рамных элементов, приходящихся на единицу ширины захвата почвообрабатывающего орудия. Установили, что увеличение ширины захвата рабочего органа позволяет уменьшить фактическую удельную конструктивную массу орудия при прочих равных условиях. Предложили использовать математическую модель при проектировании почвообрабатывающих орудий, проведении силовых расчетов и сравнительной оценки металлоемкости в зависимости от установки и расположения рабочих органов различной ширины захвата. (*Выводы*) Установили, что при пределе прочности почвы сжатия 100 000 паскалей для обеспечения заглубления плоскорежущего орудия на заданную глубину минимально допустимая конструктивная масса орудия должна составлять 334 килограмма на метр. Фактическая удельная конструктивная масса орудия в рассматриваемых условиях будет иметь минимальное значение при ширине захвата рабочего органа 0,7 и 0,8 метра – 375 и 335 килограмма на метр соответственно.

Ключевые слова: почвообрабатывающее орудие, удельная конструктивная масса, математическая модель, плоскорежущие рабочие органы, ширина захвата, заглубляющая способность.

Для цитирования: Дерепаскин А.И., Куваев А.Н., Токарев И.В. Математическая модель для определения конструктивной массы почвообрабатывающего орудия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 27-33. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-27-33.

A Mathematical Model for Determining the Specific Structural Weight of a Tillage Implement

Aleksey I. Derepaskin¹,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: celinnii@mail.ru;

Anton N. Kuvaev²,
Ph.D. student (Eng.), e-mail: kuvaevanthon@yandex.ru;
Ivan V. Tokarev¹,
research associate, e-mail: Tokarev_Ivan.V@mail.ru

¹Kostanay branch Scientific production center of agricultural engineering, Kostanay, Republic of Kazakhstan;
Kostanay Regional University named after Ahmet Baitursynov, Kostanay, Republic of Kazakhstan

Abstract. The authors have shown that the tillage specific constructive weight affects the working width and penetration ability. In order to increase the working width of the tillage implement, and therefore its performance and economic efficiency as well as its penetration ability, it is preferable to minimize the value of this indicator. It is taken into account that the implement specific

structural weight will depend on the actual number of working tools and frame elements per unit of the working width. (*Research purpose*) The aim of the work is to develop a mathematical model to determine the minimum allowable and actual specific structural weight depending on the tillage implement operating conditions and its structural design and technological scheme. (*Materials and methods*) The research methodology is based on mathematical modeling, abstraction, analysis, synthesis, and principles of classical mechanics. (*Results and discussion*) The proposed mathematical model for determining the minimum allowable and actual specific structural weight was developed. The model takes into account the physical and mechanical characteristics of the cultivated soil, the number of working bodies and frame elements per unit of the tillage implement working width. It was found out that an increase in the working width makes it possible to reduce the implement actual specific structural weight, all other things being equal. It was proposed to use the mathematical model for designing tillage tools, carrying out force calculations and comparative assessment of metal consumption, depending on the installation and location of working bodies with different working widths. (*Conclusions*) It was found out that with the soil ultimate compressive strength of 100,000 pascal, the implement minimum allowable structural weight should be 334 kilograms per meter to ensure the tillage tool penetration to a given depth. Under the considered conditions, the implement actual specific structural weight will have a minimum value at the working width of 0.7 and 0.8 meters – 375 kilograms per meter and 335 kilograms per meter, respectively.

Keywords: tillage tool, specific structural weight, mathematical model, flat-cutting working bodies, working width, penetration ability.

For citation: Derpaskin A.I., Kuvaev A.N., Tokarev I.V. Matematicheskaya model' dlya opredeleniya konstruktivnoy massy pochvoobrabatyvayushchego orudiya [A mathematical model for determining the specific structural weight of a tillage implement]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N1. 27-33 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-1-27-33.

При проектировании почвообрабатывающих машин важно учитывать конструктивную ширину захвата, от которой зависят производительность и экономическая эффективность.

Математическая модель для определения данного показателя должна учитывать скорость движения, физико-механические характеристики почвы, тяговые возможности энергетического средства и тяговое сопротивление, создаваемое почвообрабатывающей машиной [1-4]. В качестве примера рассмотрим формулу для нахождения допустимой ширины захвата почвообрабатывающего орудия [5]:

$$W_i \leq \frac{N_e \cdot \eta_t \cdot \eta_u}{(M_{sp} \cdot g \cdot f + k \cdot a + \rho \cdot a \cdot V^2) \cdot V} \quad (1)$$

где W_i – ширина захвата орудия, м;

N_e – мощность, развиваемая двигателем энергетического средства (эффективная мощность), кВт;

η_t – тяговый КПД энергетического средства;

η_u – коэффициент тягового запаса энергетического средства;

M_{sp} – удельная конструктивная масса орудия, приходящейся на 1 м ширины захвата, кг/м;

g – ускорение свободного падения, м/с²

f – коэффициент трения почвы по стали;

k – удельное сопротивление почвы, Н/м²;

a – глубина обработки, м;

ρ – плотность почвы, кг/м³;

V – скорость движения орудия, м/с.

Как видно из формулы (1), уменьшение удельной конструктивной массы орудия при прочих равных условиях позволяет увеличить ширину захвата, а сле-

довательно, производительность агрегата. Кроме того, от массы зависит стоимость почвообрабатывающего орудия, что тоже учитывается в математической модели [6].

Удельная конструктивная масса влияет не только на эксплуатационно-технологические, энергетические и экономические, но и на агротехнические показатели работы агрегата, в частности на заглубляющую способность почвообрабатывающего орудия [7]. Этот показатель служит лимитирующим фактором.

Удельная конструктивная масса орудия будет зависеть также от фактического количества рабочих органов и их конструкции, включающей симметричные (плоскорежущие или стрелчатые) и ассиметричные (плужный корпус), а также рамных элементов, приходящихся на единицу ширины захвата.

На металлоемкость почвообрабатывающего орудия влияют схемы расположения рабочих органов, ширина захвата и прочие конструктивные факторы [8]. Следует учитывать глубину обработки, схему расположения рабочих органов, режим работы (блокированный, полублокированный или свободный) на общую металлоемкость орудия [9-11]. Однако зависимость данного показателя от физико-механических свойств почвы еще не изучена.

Существует большое количество почвообрабатывающих рабочих органов, имеющих различную конструкцию и схему расположения на раме орудия [12]. Создание универсальной математической модели, учитывающей все существующее многообразие конструкций рабочих органов и их особенности, затруднительно. Мы разработали модель на примере симметрич-

ного плоскорежущего рабочего органа, наиболее распространенного в почвозащитном земледелии [13]. Данная система земледелия или ее отдельные элементы активно применяются в регионах, подверженных ветровой эрозии: в Республике Казахстан – Костанайская, Северо-Казахстанская, Павлодарская, Акмолинская области, в Российской Федерации – Курганская, Новосибирская, Омская области, Алтайский край [14]. Несмотря на появление современных технологий, исключающих механическое воздействие на почвенный слой и обладающих определенными достоинствами, проведение механической обработки почвы остается эффективным способом борьбы с уплотнением почвенного слоя и накопления влаги в условиях недостаточного увлажнения [15-17, 19-21].

Цель исследований – разработка математической модели, которая позволит определить минимально допустимую и фактическую удельную конструктивную массу в зависимости от условий эксплуатации почвообрабатывающего орудия и его конструктивно-технологической схемы.

Материалы и методы. В основу методики проведения исследований были положены математическое моделирование, абстрагирование, анализ и синтез. При составлении математических моделей использованы положения классической механики.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим почвообрабатывающее орудие с рабочими органами симметричной конструкции, равномернодвигающееся из точки *A*, соответствующей начальному положению, в точку *B*, расположенную на глубине хода рабочих органов (рис. 1).

Угол наклона отрезка *AB* относительно горизонта будет характеризовать угол заглабления рабочих органов. В этом случае движение орудия можно представить как движение тела по наклонной плоскости. Со стороны почвенного монолита на рабочие органы орудия будет действовать сила реакции *N* и сила подпора *F_п*:

$$F_{п} = \sigma \cdot S = \sigma \cdot l_{р.к.} \cdot b_{р.к.}, \tag{2}$$

где *F_п* – сила подпора, Н;

σ – предел прочности почвы сжатию, Па;

S – площадь режущей кромки рабочего органа, м²;

l_{р.к.} – общая длина режущих кромок, м;

b_{р.к.} – ширина режущей кромки, м.

В соответствии со вторым законом Ньютона и законом Амонтона-Кулона, выражением (2) при равномерном движении орудия сумма всех сил будет равна:

- по оси *x*:

$$m \cdot g \cdot \sin \alpha_3 - F_{тр} - \sigma \cdot l_{р.к.} \cdot b_{р.к.} = 0, \tag{3}$$

где *m* – масса почвообрабатывающего орудия, кг;

α₃ – угол заглабления почвообрабатывающего орудия, град.;

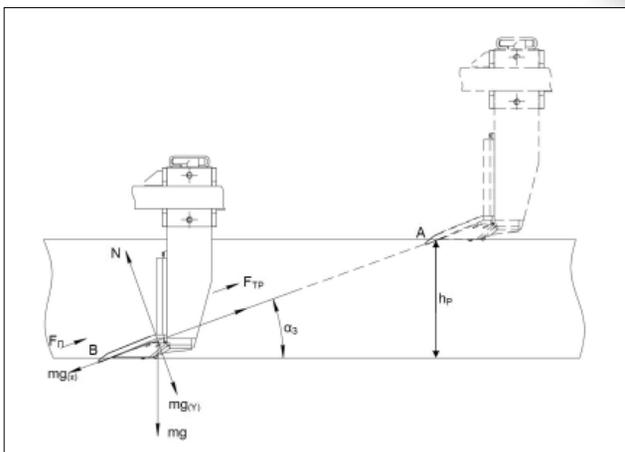


Рис. 1. Силы, действующие на почвообрабатывающее орудие при его заглаблении: *A* – начальное положение почвообрабатывающего орудия на поверхности поля; *B* – рабочее положение почвообрабатывающего орудия на заданной глубине; *h_п* – заданная глубина обработки; *N* – сила реакции опоры; *F_п* – сила подпора недеформированного почвенного слоя; *F_{тр}* – сила трения скольжения; *α₃* – угол заглабления почвообрабатывающего орудия; *mg*, *mg_(x)* и *mg_(y)* – результирующая, горизонтальная и вертикальная составляющие силы тяжести почвообрабатывающего орудия соответственно

Fig. 1. Forces acting on the tillage implement when penetrating: *A* – the tillage tool initial position on the field surface; *B* – the tillage tool working position at a given depth; *h_п* – specified processing depth; *N* – the support reaction force; *F_п* – the backup force of the undeformed soil layer; *F_{тр}* – sliding friction force; *α₃* – the tillage penetration angle; *mg*, *mg_(x)* and *mg_(y)* are the resulting, horizontal and vertical components of the tillage implement gravity, respectively

F_{тр} – сила трения скольжения, возникающая при взаимодействии почвообрабатывающего орудия и почвенного слоя, Н;

- по оси *y*:

$$N - m \cdot g \cdot \cos \alpha_3 = 0. \tag{4}$$

Решив совместно уравнения (3) и (4), получим формулу для нахождения минимальной удельной конструктивной массы орудия, необходимой для его заглабления в рассматриваемый почвенный монолит:

$$m_{уд.мин} = \frac{\sigma \cdot b_{р.к.}}{g \cdot (\sin \alpha_3 - \mu \cdot \cos \alpha_3)}, \tag{5}$$

где *m_{уд.мин}* – минимально допустимая конструктивная масса орудия, кг/м;

μ – коэффициент трения скольжения.

По формуле (1) можно вычислить минимальную удельную массу орудия. Однако для определения ее фактического значения необходимо знать, какое количество рабочих органов и рамных элементов конструкции приходится на единицу ширины захвата. В качестве примера рассмотрим наиболее распространенную шеренговую схему расположения симметрич-

ных плоскорезущих рабочих органов на раме орудия (рис. 2).

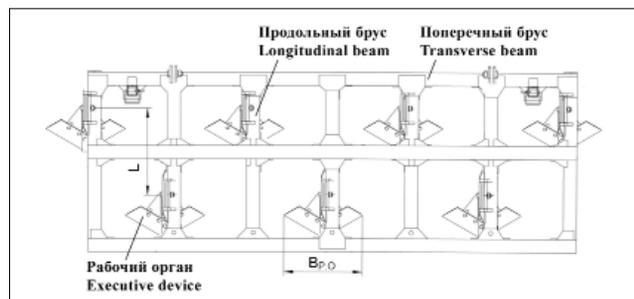


Рис. 2. Шеренговая схема расположения рабочих органов на раме орудия: L – расстояние между стойками рабочих органов; $B_{р.о.}$ – ширина захвата рабочего органа

Fig. 2. Ranking diagram of the working bodies arrangement on the implement frame: L – is the distance between the racks of the working bodies; $B_{р.о.}$ – the working width of the working body

Фактическая удельная конструктивная масса орудия равна:

$$m_{уд.ФАКТ.} = m_{р.о.(уд)} + m_{РАМ(уд)}, \quad (6)$$

где $m_{уд.ФАКТ.}$ – фактическая удельная конструктивная масса орудия, кг/м;

$m_{р.о.(уд)}$ – удельная конструктивная масса рабочих органов, приходящихся на единицу ширины захвата орудия, кг/м;

$m_{РАМ(уд)}$ – удельная конструктивная масса рамы орудия, приходящаяся на единицу ширины захвата орудия, кг/м.

В свою очередь $m_{РАМ(уд)}$ можно представить в упрощенном виде:

$$m_{РАМ(уд)} = m_{ПР.Б(уд)} + m_{П.Б(уд)} + m_{Э(уд)}, \quad (7)$$

где $m_{ПР.Б(уд)}$ – удельная конструктивная масса продольных брусьев рамы, приходящаяся на единицу ширины захвата орудия, кг/м;

$m_{П.Б(уд)}$ – удельная конструктивная масса поперечных брусьев рамы, приходящаяся на единицу ширины захвата орудия, кг/м;

$m_{Э(уд)}$ – удельная конструктивная масса добавочных элементов (накладок), усиливающих сварные швы, приходящаяся на единицу ширины захвата орудия, кг/м.

При этом:

$$m_{р.о.(уд)} = m_{р.о.} / B_{р.о.}, \quad (8)$$

где $m_{р.о.}$ – масса одного рабочего органа, кг;

$B_{р.о.}$ – ширина захвата рабочего органа, м.

Конструктивная масса продольных брусьев равна:

$$m_{ПР.Б(уд)} = \frac{L \cdot M_{ПР.Б(уд)}}{B_{р.о.}}, \quad (9)$$

где L – расстояние между стойкам рабочих органов, м;

$M_{ПР.Б(уд)}$ – удельная конструктивная масса 1 м продольного бруса, кг/м.

Аналогично:

$$m_{П.Б(уд)} = \frac{M_{П.Б(уд)} \cdot k}{B_{р.о.}}, \quad (10)$$

где k – количество поперечных брусьев ($2k \leq 3$), шт.

Как показал анализ конструкций существующих почвообрабатывающих орудий, между $m_{Э(уд)}$, $m_{ПР.Б(уд)}$ и $m_{П.Б(уд)}$ существует следующая зависимость:

$$m_{Э(уд)} = 0,1 \cdot m_{ПР.Б(уд)} + m_{П.Б(уд)}. \quad (11)$$

Решая уравнения (6)-(11) совместно, получим:

$$m_{уд.ФАКТ.} = m_{р.о.(уд)} + 1,1 \cdot (m_{ПР.Б(уд)} + m_{П.Б(уд)}) = \frac{m_{р.о.} + 1,1 \cdot (L \cdot M_{ПР.Б(уд)} + k \cdot M_{П.Б(уд)})}{B_{р.о.}} \quad (12)$$

Для нахождения расстояния между стойкам рабочих органов можно воспользоваться формулой [18]:

$$L = 1,5 \cdot h_p \cdot ctg\psi + l_l \cdot sin\beta + \frac{V^2 \cdot sin2\beta \cdot cos\beta}{g}, \quad (13)$$

где ψ – угол наклона плоскости сдвига почвенного слоя под воздействием рабочего органа, град.;

l_l – ширина лемеха, м;

β – угол установки лемеха ко дну борозды, град.

При проектировании почвообрабатывающих орудий для обеспечения заглубления орудия на требуемую глубину в заданных условиях эксплуатации должно выполняться следующее условие:

$$m_{уд.min} \leq m_{уд.ФАКТ.} \quad (14)$$

Следовательно, если для рассматриваемого варианта расчетное значение $m_{уд.ФАКТ.}$ не будет соответствовать формуле (14), то для обеспечения заглубления орудия в рассматриваемых почвенных условиях должно быть принято, что $m_{уд.ФАКТ.} = m_{уд.min.}$

Рассмотрим влияние ширины захвата плоскорезущего рабочего органа для глубокой обработки на удельную конструктивную массу почвообрабатывающего орудия.

Для расчета используем исходные данные:

предел прочности почвы сжатия, σ	100 000 Па;
ширина режущей кромки, $b_{р.к.}$	0,002 м;
ускорение свободного падения, g	9,81 м/с ² ;
угол заглубления почвообрабатывающего орудия, α_3	20 град.;
коэффициент трения скольжения стали по почве, μ	0,3;
масса плоскорезущего рабочего органа, $m_{р.о.}$, при ширине захвата рабочего органа $B_{р.о.}$:	
	0,6 м 65 кг;
	0,7 м 70 кг;
	0,8 м 75 кг;
	0,9 м 80 кг;
	1,0 м 85 кг;

расстояние между стойкам рабочих органов, L 0,9 м;
 удельная конструктивная масса 1 м бруса:
 продольного, МПР.Б.(уд) 45 кг/м;
 поперечного, МП.Б.(уд) 45 кг/м;
 количество поперечных брусьев, k 3 шт.

В соответствии с формулой (5) определим минимальную удельную конструктивную массу орудия:

$$m_{уд, \min} = \frac{100000 \cdot 0,002}{9,81 \cdot (0,34 - 0,30 \cdot 0,94)} = 334,00 \text{ кг/м.}$$

Используя выражение (12), найдем расчетное значение $m_{уд, \text{ФАКТ.}}$ для плоскорежущих рабочих органов шириной захвата $B_{р.о.} = 0,6-1,0$ м. Получили зависимость $m_{уд, \text{ФАКТ.}} = f(B_{р.о.})$ (рис. 3).

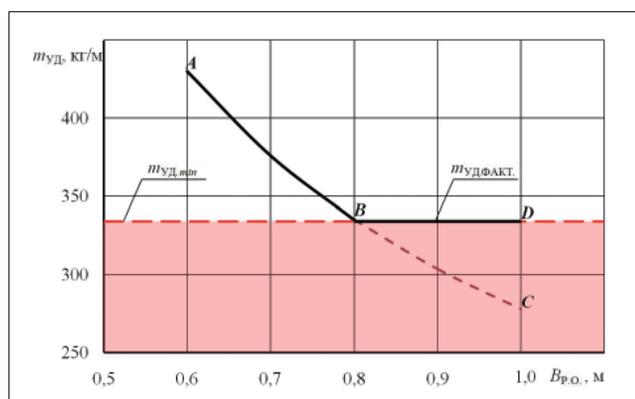


Рис. 3. Влияние ширины захвата плоскорежущего рабочего органа $B_{р.о.}$ на удельную конструктивную массу орудия $m_{уд.}$: $m_{уд, \text{ФАКТ.}}$ – фактическая удельная конструктивная масса орудия; $m_{уд, \min}$ – минимально допустимая конструктивная масса орудия; AB – участок, где $m_{уд, \text{ФАКТ.}} \rightarrow \min$; BC – недопустимые значения $m_{уд, \text{ФАКТ.}}$; BD – участок, где $m_{уд, \text{ФАКТ.}} = \text{const}$.

Fig. 3. Influence of the flat-cutting tool working width $B_{р.о.}$ on the tool specific structural weight – $m_{уд.}$: $m_{уд, \text{ФАКТ.}}$ – the tool actual specific structural weight; $m_{уд, \min}$ – the tool minimum allowable structural weight; AB – the area, where $m_{уд, \text{ФАКТ.}} \rightarrow \min$; BC – invalid values of $m_{уд, \text{ФАКТ.}}$; BD – the area, where $m_{уд, \text{ФАКТ.}} = \text{const}$.

Анализ полученных результатов показал следующее:

- на интервале $B_{р.о.} = [0,6; 0,8]$ м наблюдается относительно крутое убывание функции $m_{уд, \text{ФАКТ.}} = f(B_{р.о.})$ – участок кривой AB . Так, при $B_{р.о.} = 0,7$ м значение $m_{уд, \text{ФАКТ.}}$ снизилось на 12,8% ($m_{уд, \text{ФАКТ.}} = 375$ кг/м), при $B_{р.о.} = 0,8$ м – на 22,1% ($m_{уд, \text{ФАКТ.}} = 335$ кг/м) в сравнении с начальной точкой $B_{р.о.} = 0,6$ м ($m_{уд, \text{ФАКТ.}} = 430$ кг/м). Значение функции $m_{уд, \text{ФАКТ.}} = f(B_{р.о.})$ на рассматриваемом интервале соответствует условию, указанному в формуле (14);

- на интервале $B_{р.о.} = [0,9; 1,0]$ м значение функции $m_{уд, \text{ФАКТ.}} = f(B_{р.о.})$ меньше $m_{уд, \min}$ – участок кривой BC (выделен пунктиром). Так, при $B_{р.о.} = 0,9$ м расчетное значение $m_{уд, \text{ФАКТ.}} = 303$ кг/м, при $B_{р.о.} = 0,9$ м – 278 кг/м. Следовательно, на этом интервале для обеспечения заглубления орудия в рассматриваемых почвенных условиях в соответствии с формулой (14) $m_{уд, \text{ФАКТ.}} = m_{уд, \min} = 334$ кг. Функция $m_{уд, \text{ФАКТ.}} = f(B_{р.о.})$ будет постоянной – участок BD .

Увеличение $B_{р.о.}$ до определенного предела, который главным образом зависит от прочностных свойств почвы, что отражено в формуле (2), способствует уменьшению $m_{уд, \text{ФАКТ.}}$ – участок кривой AB (рис. 3). Дальнейший рост этого показателя уже не дает аналогичного эффекта, так как снижение удельной конструкционной массы орудия в соответствии с формулой (14) возможно до тех пор, пока выполняется условие $m_{уд, \min} \leq m_{уд, \text{ФАКТ.}}$. В этом случае значение фактической удельной массы орудия должно удовлетворять равенству $m_{уд, \text{ФАКТ.}} = m_{уд, \min}$, а функция $m_{уд, \text{ФАКТ.}} = f(B_{р.о.})$ будет постоянной – участок кривой BD (рис. 3).

Полученные результаты исследований могут быть использованы при проектировании почвообрабатывающих орудий. Однако при обосновании ширины захвата рабочего органа $B_{р.о.}$ необходимо учесть, что ее оптимальное значение должно определяться в первую очередь из условия обеспечения качественного выполнения технологического процесса в заданных условиях.

Выводы. Предложили математическую модель для нахождения минимально допустимой и фактической удельной конструктивной массы почвообрабатывающего орудия, которая учитывает физико-механические характеристики обрабатываемой почвы, количество рабочих органов и рамных элементов конструкции, приходящихся на единицу ширины захвата. Представленная математическая модель может быть использована при проектировании вновь создаваемых почвообрабатывающих орудий, проведении силовых расчетов и сравнительной оценки металлоемкости орудий с рабочими органами различной ширины захвата.

Установили, что при пределе прочности почвы сжатию 100 000 Па для обеспечения заглубления плоскорежущего орудия на заданную глубину минимально допустимая конструктивная масса орудия должна составлять 334 кг/м. Фактическая удельная конструктивная масса орудия в рассматриваемых условиях будет иметь минимальное значение при ширине захвата рабочего органа 0,7 и 0,8 м – 375 кг/м и 335 кг/м соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хафизов К.А., Хафизов Р.Н. Энергетический метод оптимизации основных параметров трактора // Вестник Казанского аграрного университета. 2015. N1(35). С. 75-81.
 2. Хафизов К.А., Хафизов Р.Н. Результаты многофактор-

- ного эксперимента по определению зависимости максимального давления колес трактора на почву от параметров трактора и физико-механических свойств почвы. Анализ уравнений // *Вестник Казанского аграрного университета*. 2016. N4(42). С. 94-98.
3. Cardei P, Matache M.G., Nutescu C. Optimum working conditions for variable width ploughs. *ResearchGate*. 2017. August.
 4. Nurmiev A., Khafizov C. Optimization of main parameters of tractor working with soil-processing implement. *Engineering for rural development*. 2018. 161-167.
 5. Kuvaev A., Derepaskin I., Tokarev I. Substantiation of the working width of the tillage implement. *Acta universitatis agriculturae et silviculturae mendellianae brunensis*. 2021. Vol. 69. 21-31.
 6. Yezekyan T., Benetti M., Armentano G., Trestini S., Sartori L., Marinello F. Definition of Reference Models for Power, Mass, Working Width, and Price for Tillage Implements. *Agriculture*. 2021. Vol. 11(3). 197.
 7. Синеоков Г.Н. Проектирование почвообрабатывающих машин. М.: Машиностроение. 1965. 310 с.
 8. Бледных В.В. Техничко-экономический анализ производительности пахотных агрегатов // *Труды ЧИМЭСХ*. 1973. N72. С. 65-84.
 9. Рахимов Р.С., Рахимов И.Р., Касымов Ф.Ф. и др. Определение металлоемкости орудий при их проектировании // *АПК России*. 2015. N74. С. 110-117.
 10. Дерепаскин А.И., Комаров А.П. Обоснование схем расположения рабочих органов почвообрабатывающих орудий по критериям металлоемкости и тяговому сопротивлению // *Техника и оборудование для села*. 2021. N8. С. 10-13.
 11. Дерепаскин А.И., Полищук Ю.В., Дядюченко А.Ф. Обоснование схемы расположения рабочих органов широкозахватного плоскореза к трактору тягового класса 8 по критериям материалоемкости и тяговому сопротивлению // *Сельскохозяйственные технологии*. 2019. Т. 1. N4. С. 1-9.
 12. Дерепаскин А.И., Куваев А.Н. Классификация рабочих органов для механической обработки почвы // *3i: intellect, idea, innovation*. 2020. N2. С. 73-81.
 13. Бараев А.И. Почвозащитное земледелие М.: Колос. 1975. 301 с.
 14. Ершов В.Л., Авдеенко А.И., Калошин А.А. Адаптация почвозащитных агротехнологий в земледелии лесостепных и степных ландшафтов Западной Сибири // *Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ*. 2017. N2(9).
 15. Blanco-Canqui H., Ruis J. S. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*. 2018. Vol. 326. N15. 164-200.
 16. Peixoto D.S., Moreira de Silvia L., Batista de Melo L., et al. Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. *Science of the total environment*. 2020. Vol. 745. 140887.
 17. Schneider F., Don A., Hennings I., et al. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? *Soil and tillage research*. 2017. Vol. 174. 193-204.
 18. Дерепаскин А.И., Полищук Ю.В., Куваев А.Н., Токарев И.В. Обоснование технологической схемы и параметров рабочих органов для основной обработки уплотненных почв // *Международная агроинженерия*. 2016. N3. С. 29-37.
 19. Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N3(36). С. 40-45.
 20. Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Старовойтов С.И., Ценч Ю.С., Шогенов А.Х. Трехсекционный почвообрабатывающий агрегат с универсальными сменными рабочими органами // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 14. N3(54). С. 92-95.
 21. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И., Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С. Цифровые технологии в почвообработке // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. N1(30). С. 191-197.

REFERENCES

1. Khafizov K.A., Khafizov R.N. Energeticheskiy metod optimizatsii osnovnykh parametrov traktora [Energy method for the optimization of tractor main parameters]. *Vestnik Kazanskogo agrarnogo universiteta*. 2015. N1(35). 75-81 (In Russian).
2. Khafizov K.A., Khafizov R.N. Rezul'taty mnogofaktornogo eksperimenta po opredeleniyu zavisimosti maksimal'nogo davleniya koles traktora na pochvu ot parametrov traktora i fiziko-mekhanicheskikh svoystv pochvy. Analiz uravneniy [Results of multivariate experiment to determine the dependence of tractor wheels' maximum pressure on soil on tractor's parameters and soil physical and mechanical properties. Equation analysis]. *Vestnik Kazanskogo agrarnogo universiteta*. 2016. N4(42). 94-98 (In Russian).
3. Cardei P, Matache M.G., Nutescu C. Optimum working conditions for variable width ploughs. *ResearchGate*. 2017. August (In English).
4. Nurmiev A., Khafizov C. Optimization of main parameters of tractor working with soil-processing implement. *Engineering for rural development*. 2018. 161-167 (In English).
5. Kuvaev A., Derepaskin I., Tokarev I. Substantiation of the working width of the tillage implement. *Acta universitatis agriculturae et silviculturae mendellianae brunensis*. 2021. Vol. 69 (In English).
6. Yezekyan T., Benetti M., Armentano G., Trestini S., Sartori L., Marinello F. Definition of Reference Models for Power, Mass, Working Width, and Price for Tillage Implements. *Agriculture*. 2021. Vol. 11 (In English).
7. Sineokov G.N. Proektirovanie pochvoobrabatyvayushchikh mashin [Design of the tillage implement]. Moscow: Mashinostroenie. 1965. 310 (In Russian).
8. Blednykh V.V. Tekhniko-ekonomicheskiy analiz proizvod-

- tel'nosti pakhotnykh agregatov [Technical and economic analysis of the tillage implement efficiency]. *Trudy CHIMESKH*. 1973. N72. 65-84 (In Russian).
9. Rakhimov R.S., Rakhimov I.R., Kasymov F.F., et al. Opredelenie metalloemkosti orudiy pri ikh proektirovanii [Determining the specific metal content when designing tools]. *APK Rossii*. 2015. N74. 110-117 (In Russian).
 10. Derepaskin A.I., Komarov A.P. Obosnovanie skhem raspolozheniya rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh orudiy po kriteriyam metalloemkosti i tyagovomu soprotivleniyu [Justification of schemes of position of the tillage tools of agricultural implements on the criteria of material capacity and traction resistance]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2021. N8. 10-13 (In Russian).
 11. Derepaskin A.I., Polishchuk Yu.V., Dyadyuchenko A.F. Obosnovanie skhemy raspolozheniya rabochikh organov shirokozakhvatnogo ploskoreza k traktoru tyagovogo klassa 8 po kriteriyam materialoemkosti i tyagovomu soprotivleniyu [The rationale for the layout of working bodies of the wide-reach flat cutter for the tractor of traction class 8 by the criteria of material consumption and rolling resistance]. *Sel'sk Khozyaystvennye tekhnologii*. 2019 N4 (In Russian).
 12. Derepaskin A.I., Kuvaev A.N. Klassifikatsiya rabochikh organov dlya mekhanicheskoy obrabotki pochvy [Classification of working tools for mechanical soil tillage]. *3i: intellect, idea, innovation*. 2020. N2. 73-81 (In Russian).
 13. Baraev A.I. Pochvozashchitnoe zemledelie [Soil protection agriculture]. Moscow: Kolos. 1975. 301 (In Russian).
 14. Ershov V.L., Avdeenko A.I., Kaloshin A.A. Adaptatsiya pochvozashchitnykh agrotekhnologiy v zemledelii lesostepnykh i stepnykh landshaftov Zapadnoy Sibiri [Optimization of Soil Protective Agricultural Technologies in Crop Farming of Forest-Steppe and Steppe Landscapes in Western Siberia]. *Elektronnyy nauchno-metodicheskiy zhurnal Omskogo GAU*. 2017. N2 (In Russian).
 15. Blanco-Canqui H., Ruis J. S. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*. 2018. Vol. 326 (In English).
 16. Peixoto D.S., Moreira de Silvia L., Batista de Melo L., et al. Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. *Science of the total environment*. 2020. Vol. 745 (In English).
 17. Schneider F., Don A., Hennings I., et al. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? *Soil and tillage research*. 2017. Vol. 174 (In English).
 18. Derepaskin A.I., Polishchuk Yu.V., Kuvaev A.N., Tokarev I.V. Obosnovanie tekhnologicheskoy skhemy i parametrov rabochikh organov dlya osnovnoy obrabotki uplotnennykh pochv [Rationale technological schemes and parameters of working organs for primary treatment compaction]. *Mezhdunarodnaya agroinzheneriya*. 2016. N3. 29-37 (In Russian).
 19. Lobachevskiy Ya.P., Beylis V.M., Tsench Yu.S. Aspekty tsifrovizatsii sistemy tekhnologiy i mashin [Aspects of digitalization of the system of technologies and machines]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N3(36). 40-45 (In Russian).
 20. Ahalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh., Starovoytov S.I., Tsench Yu.S., Shogenov A.Kh. Trekhseksionnyy pochvoobrabatyvayushchiy agregat s universal'nymi smennymi rabochimi organami [Three-section tillage unit with universal replaceable working bodies]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019. Vol. 14. N3(54). 92-95 (In Russian).
 21. Lobachevskiy Ya.P., Starovoytov S.I., Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S. Tsifrovye tekhnologii v pochvoobrabotke [Digital technologies in tillage]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2019. N1(30). 191-197 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Дерепаскин А.И. – научное руководство, формирование основных направлений исследований.

Кuvaев А.Н. – изучение состояния вопроса, разработка математических моделей, анализ полученных результатов.

Токарев И.В. – изучение состояния вопроса, проведение расчетов, визуализация.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Derepaskin A.I. – scientific supervision, overall research design.
Kuvaev A.N. – study of the general state of knowledge in the research area, development of mathematical models, analysis and interpretation of the obtained results.

Tokarev I.V. – study of the general state of knowledge in the research area, performing calculations, visualization.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

08.02.2022

03.03.2022