



Расчет шага почвообрабатывающей фрезы с зубцеобразной формой

Парвиз Имранович Гаджиев¹,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: pgadjiev@yandex.ru;
Мансур Магфурович Махмутов¹,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: mansur.mahmutov@yandex.ru;

Алексей Игоревич Алексеев²,
аспирант, e-mail: aleks87mo@rambler.ru;
Марат Мансурович Махмутов³,
кандидат технических наук,
e-mail: maratmax@yandex.ru

¹Российский государственный аграрный заочный университет, г. Балашиха, Московская область, Российская Федерация;

²Мичуринский государственный аграрный университет, г. Мичуринск, Тамбовская область, Российская Федерация;

³Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Реферат. Высокая энергоёмкость фрезерования почв служит сдерживающим фактором их широкого применения. Фрезы применяют в тех случаях, когда нет альтернативы по качеству обработки, особенно тяжелых и задернелых почв. Показали, что модернизированные почвообрабатывающие фрезы имеют зубцеобразную форму. Рассмотрели вопросы оптимального расположения ножей относительно барабана. (*Цель исследований*) Получить зависимости для расчета шага зубцеобразной фрезы почвообрабатывающей машины для предпосадочной обработки почвы перед посадкой картофеля. (*Материалы и методы*) Отметили отсутствие методик при выборе основных параметров и режимов работы почвообрабатывающих фрез с зубцеобразной формой. Подтвердили необходимость нового подхода в выборе профиля рабочей поверхности ножа фрезы с целью уменьшения энергоёмкости фрезерования и улучшения качества обработки. Использовали математические и графические расчеты для определения оптимального шага ступни. (*Результаты и обсуждение*) Представили выражение для определения объема рыхления почвы при работе почвообрабатывающих фрез. Рассчитали, что с увеличением глубины обработки почвы от 0,10 до 0,15 метра шаг ступни повышается с 0,04 до 0,06 метра и оптимально составляет 0,05 метра. Для ориентировочных инженерных расчетов приняли, что оптимальный параметр шага ступни равен 0,25-0,45 от значения подачи на нож. (*Выводы*) Установили, что количество ножей в одной секции и ширина захвата ножа не влияют на величину оптимального шага зубьев. Определили, что этот показатель линейно зависит от глубины обработки почвы: с ее увеличением на 0,05 метра оптимальный шаг ступни возрастает на 0,025 метра. Показали, что с увеличением рабочей скорости фрезы уменьшаются удельные затраты энергии на обработку пласта, а эффективность обработки почвы улучшается.

Ключевые слова: почвообрабатывающие машины, фрезерование почвы, шаг фрезы, зубцеобразная фреза, энергоёмкость почвообработки.

■ **Для цитирования:** Гаджиев П.И., Махмутов М.М., Алексеев А.И., Махмутов М.М. Расчет шага почвообрабатывающей фрезы с зубцеобразной формой // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №5. С. 21-25. DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-21-25.

Calculating the Pitch of a Serrated-Type Rotary Tiller

Parviz I. Gadzhiev¹,
Dr.Sc.(Eng.), professor, e-mail: pgadjiev@yandex.ru;
Mansur M. Makhmutov¹,
Dr.Sc.(Eng.), associate professor,
e-mail: mansur.mahmutov@yandex.ru;

Aleksei I. Alekseev²,
postgraduate student,
e-mail: aleks87mo@rambler.ru;
Marat M. Makhmutov³,
Ph.D.(Eng.), e-mail: maratmax@yandex.ru

¹Russian State Agrarian Correspondence University, Balashikha, Moscow Region, the Russian Federation;

²Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Tambov Region, the Russian Federation;

³Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, the Russian Federation

Abstract. The high energy intensity associated with rotary tillage of soil serves as a deterrent for its widespread use. Rotary tillers are used in cases when there are no alternatives as to the soil quality, especially when machining hard and sod-covered soils. The authors have described new modernized rotary tillers of a serrated type and considered the optimal location of knives relative to the drum. (*Research purpose*) To determine the relationships for calculating the pitch of a serrated-type rotary tiller for soil preparation before potato planting. (*Materials and methods*) The authors have noted that currently, there are no methods for selecting the main parameters and operation modes of serrated-type rotary tillers. The research has proved that a new approach is required for selecting the working surface profile of the rotary tiller knife in order to reduce the energy consumption of tillage and improve its quality. The authors have used mathematical and graphical calculations to determine the optimal pitch of the tiller foot. (*Results and discussion*) The paper presents an expression for determining the amount of soil loosening during the operation of rotary tillers. It has been calculated that an increase in the tillage depth from 0.10 to 0.15 meters results in an increase in the pitch of a tiller foot from 0.04 to 0.06 meters and the optimal value is 0.05 meters. For approximate engineering calculations, it has been assumed that the optimal parameter of a foot pitch is 0.25-0.45 of the knife loading value. (*Conclusions*) It has been found that the number of knives in one section and the operating width of a knife do not affect the optimal tooth pitch. It has been determined that this indicator linearly depends on the depth of tillage: as it increases by 0.05 meters, the optimal foot step increases by 0.025 meters. It has been shown that as the working speed of the rotary tiller increases, specific energy consumption required for the treatment of a furrow slice decreases, and the efficiency of soil tillage improves.

Keywords: soil tillage machines, soil rotary tillage, rotary tiller pitch, serrated rotary tiller, energy intensity of soil tillage.

For citation: Gadzhiev P.I., Makhmutov M.M., Alekseev A.I., Makhmutov M.M. Raschet shaga pochvoobrabatyvayushchey frezy s zubtseobraznoy formoy [Calculating the pitch of a serrated-type rotary tiller]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 21-25. (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-21-25.

Почвообрабатывающие машины с активными ротационными рабочими органами типа фрезы обеспечивают высокое качество крошения на разных типах почв. Анализ исследований российских и иностранных ученых показывает, что по производительности обрабатывания тяжелых по механическому составу почв ротационные почвообрабатывающие машины (фрезы) занимают одно из важных мест при предпосадочной обработке почвы [1]. Наряду с высококачественным исполнением технологических функций, ротационные почвообрабатывающие машины (фрезы) понижают тяговое сопротивление агрегата. Их широкое применение сдерживается из-за повышенной энергоемкости фрезерования почв и меньшей технической безопасности по сравнению с классическими машинами и орудиями [2]. Вследствие этого фрезы применяют в тех случаях, когда для них нет альтернативы по качеству обработки, особенно при обработке тяжелых и задернелых почв [3]. Модернизированные почвообрабатывающие фрезы имеют зубцеобразную форму [4]. От правильного выбора шага ступни, то есть расстояния между верхним и нижним ножами, зависят не только качество обработки почвы, но и характеристики подталкивающих действий сил от машинно-тракторного агрегата (МТА) [5, 6].

Цель исследования – получить зависимости для расчета шага зубцеобразной фрезы почвообрабатывающей машины для предпосадочной обработки почвы перед посадкой картофеля.

Материалы и методы. Во время полевых испытаний соблюдены нормативы всех параметров, которые соответствовали техническим требованиям, изложен-

ным в межгосударственном стандарте ГОСТ-28516-90.

При обнаружении каких либо отклонений проводилась регулировка рабочих органов с учетом условий проведения эксперимента.

В программу испытаний включены несколько видов оценок:

- эксплуатационно-технологическая оценка работы;
- агротехническая оценка агрегата;
- экономическая оценка по результатам работы.

При оценке эксплуатационно-технологического показателя руководствовались ГОСТ 24055-88, ГОСТ 24056-88, ГОСТ 24057-88, ОСТ 70.4.2-80, ОСТ 10.4.2-2001.

Агротехническую оценку фрезерной машины осуществляли в соответствии с ОСТ 10 1.1-98, ОСТ 10 4.2-2001 и ОСТ 70.4.2-80.

Рассмотрим активный рабочий орган ротационной почвообрабатывающей машины (рис. 1). При шаге ступни t_s , равном глубине обработки почвы h_o , рыхление почвы будет осуществляться только ножом второй ступни 2. Действие подталкивающих сил от трактора P_f в системе МТА будут незначительны.

С уменьшением шага ступни образуется слой почвы сверху и снизу второго ножа, который начинает взаимодействовать с почвой. В результате улучшается структура обработки почвы и повышается действие подталкивающих сил в системе МТА.

Результаты и обсуждение. При шаге ступни, равном нулю, под вторым ножом слой почвы уменьшается до минимума, что ухудшает рыхление почвы и действие подталкивающих сил. Оптимальным шагом ступни будет то значение, при котором объем рыхле-

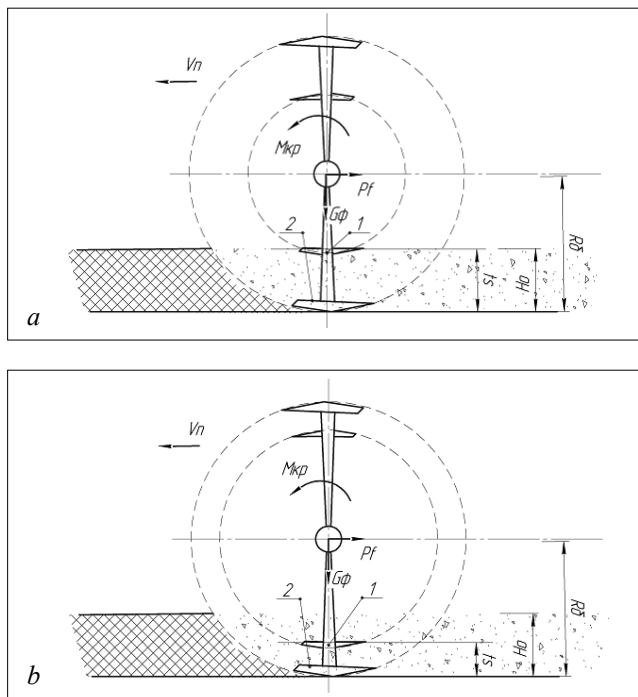


Рис. 1. Работа ножей зубцеобразной формы при шаге ступни, равном: а – глубине обработки почвы; б – половине глубины обработки почвы

V_n – поступательная скорость фрезы, м/с; $M_{кр}$ – крутящий момент от колеса, Нм; P_f – сила сопротивления, Н; $G_ф$ – нагрузка на фрезу, Н; $R_δ$ – радиус барабана фрезы, м; H_0 – глубина обработки почвы, м; t_s – шаг ступни, м

Fig. 1. Operation of serrated-type knives at a foot pitch equaling: a – the depth of tillage; b – the half-depth of tillage.

V_n – translational speed of the rotary tiller, m/s; $M_{кр}$ – torque from the wheel, Nm; P_f – resistance force, N; $G_ф$ – loading on the rotary tiller, N; $R_δ$ – the radius of the rotary tiller drum, m; H_0 – soil cultivation depth, m; t_s – foot pitch, m

ния первым и вторым ножом будут одинаковым [7].

Определим объем рыхления почвы при работе почвообрабатывающих фрез:

$$V_c = S_c \times b_i = \frac{\left(R_a \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{h_0^2}{R_a^2}} \right) \cdot (\lambda \cdot h_0 + 2 \cdot R_a) + (\lambda \cdot R_a + 2 \cdot h_0) \cdot \arcsin \left(\frac{h_0}{R_a} \right) \right) \times b_i}{50 \cdot \lambda \times Z_i}, \quad (1)$$

где V_c – объем рыхления почвы, м³;

S_c – площадь рыхления почвы, м²;

R_a – радиус барабана, м;

h_0 – глубина обработки почвы, м;

λ – показатель кинематического режима работы фрезы;

Z_i – число ножей в одной секции, шт.;

b_i – ширина захвата ножа, м.

С увеличением шага ступни объем рыхления по-

чвы над первой ступенью (ближе к центру барабана) будет уменьшаться и определится:

$$V_{C1} = \frac{\left(R_δ - t_s \right) \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{(h_0 - t_s)^2}{(R_δ - t_s)^2}} \right) \cdot (\lambda \cdot (h_0 - t_s) + 2 \cdot (R_δ - t_s))}{50 \cdot \lambda \times Z_H} + \frac{2 \cdot (R_δ - t_s) + (\lambda \cdot (R_δ - t_s) + 2 \cdot (h_0 - t_s)) \cdot \arcsin \left(\frac{h_0 - t_s}{(R_δ - t_s)} \right)}{50 \cdot \lambda \times Z_H} \times b_H, \quad (2)$$

где V_{C1} – объем рыхления почвы над первой ступенью, м³;

t_s – шаг зубьев, м;

b_H – ширина захвата ножа, м.

Объем рыхления почвы над второй ступенью с повышением шага ступни будет увеличиваться по выражению: $V_{C2} = V_c - V_{C1}$, (3)

При оптимальном значении шага ступни объем почвы V_{C1} будет равен V_{C2} . Выразим математически:

$$V_{C1} - V_{C2} = 0, \rightarrow V_{C1} - (V_c - V_{C1}) = 0, \rightarrow 2 \times V_{C1} - V_c = 0$$

$$\left(\left(R_a - t_s \right) \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{(h_0 - t_s)^2}{(R_a - t_s)^2}} \right) \cdot (\lambda \cdot (h_0 - t_s) + 2 \cdot (R_a - t_s)) + R_a \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{h_0^2}{R_a^2}} \right) \cdot (\lambda \cdot h_0 + 2 \cdot R_a) + (\lambda \cdot (R_a - t_s) + 2 \cdot (h_0 - t_s)) \cdot \arcsin \left(\frac{h_0 - t_s}{(R_a - t_s)} \right) \right) \times 0,04 b_i - \left(\left(R_a \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{h_0^2}{R_a^2}} \right) \cdot (\lambda \cdot h_0 + 2 \cdot R_a) + (\lambda \cdot R_a + 2 \cdot h_0) \cdot \arcsin \left(\frac{h_0}{R_a} \right) \right) \times 0,02 b \right) \times \lambda^{-1} \times Z_i^{-1} = 0 \quad (4)$$

Математически определить оптимальное значение шага ступни из уравнения (4) затруднительно, но можно изобразить графически (рис. 2).

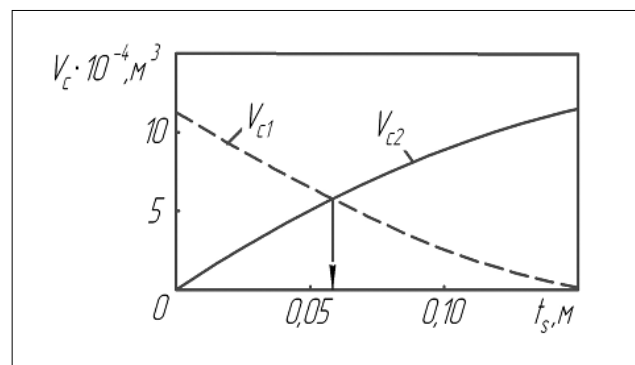


Рис. 2. Оптимальное значение шага ступни для условий:

$R_δ = 0,3$ м; $h_0 = 0,15$ м; $\lambda = 4$; $Z_i = 3$ шт.; $b_H = 0,05$ м

Fig. 2. Optimal value of the foot pitch for conditions: $R_δ = 0.3$ m; $h_0 = 0.15$ m; $\lambda = 4$; $Z_i = 3$ pcs.; $b_H = 0.05$ m.

С увеличением глубины обработки почвы от 0,10 до 0,15 м шаг ступни повышается с 0,04 до 0,06 м и оптимально составляет 0,05 м (рис. 3). Для ориентировочных инженерных расчетов можем принять, что оптимальный параметр шага ступни составляет 0,25-0,45 от значения подачи на нож, то есть:

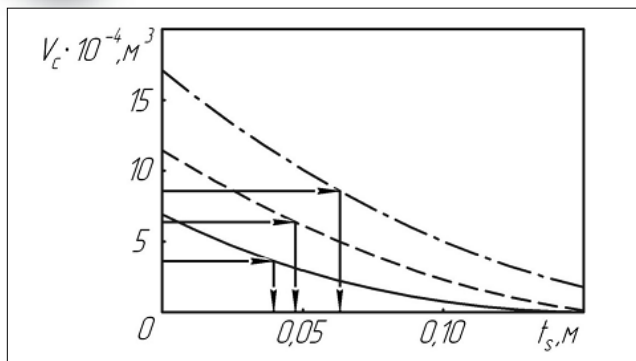


Рис. 3. Выбор оптимального значения шага ступни в зависимости от глубины обработки почвы:

— $h_o = 0,10$ м; - - - - - $h_o = 0,15$ м; ······ $h_o = 0,20$ м

Fig. 3. Selecting the optimal value of the foot pitch depending on the depth of tillage:

— $h_o = 0,10$ m; - - - - - $h_o = 0,15$ m; ······ $h_o = 0,20$ m

$$t_s = (0,25 - 0,45) \cdot S_n, \quad (5)$$

где S_n – подача на нож фрезы, мм/об.

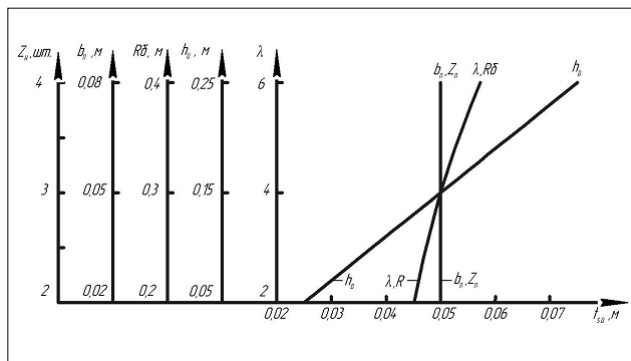


Рис. 4. Влияние исследуемых факторов на оптимальный шаг ступни:

h_o – глубина обработки почвы, м; R_b – радиус барабана, м;

λ – показатель кинематического режима работы фрезы; Z_n – число ножей в одной секции, шт.; b_n – ширина захвата ножа, м

Fig. 4. Influence of the studied factors on the optimal foot pitch: h_o – tillage depth, m; R_b – drum radius, m; λ – an indicator of the kinematic mode of the rotary tiller operation; Z_n – the number of knives in one section, pcs.; b_n – operating width of a knife, m.

УРОВНИ И ИНТЕРВАЛЫ ВАРИРОВАНИЯ ФАКТОРОВ LEVELS AND INTERVALS OF THE VARIATION OF FACTORS					
Уровни Levels	Глубина обработки почвы, h_o , м Tillage depth, h_o , m	Радиус барабана, R_b , м Drum radius, R_b , m	Показатель кинематического режима работы фрезы, λ Indicator of the kinematic operation mode of a rotary tiller, λ	Число ножей в одной секции, Z_n , шт. Number of knives in one section, Z_n , pcs.	Ширина захвата ножа, b_n , м Operating width of a knife, b_n , m
Нижний Lower	0,05	0,2	2	2	0,02
Центральный Central	0,15	0,3	4	3	0,05
Верхний Upper	0,25	0,4	6	4	0,08
Интервал варьирования Range of variation	0,10	0,1	2	1	0,03

Подача на нож – величина постоянная и зависит от радиуса барабана, числа ножей и отношения поступательной скорости машины к окружной скорости барабана. Этот показатель определяет степень крошения обработанной почвы.

Можно определить оптимальный шаг ступни графически, если значение объема стружки при шаге ступни, равно нулю, разделить пополам и от полученного значения провести горизонтальную линию до кривой, описывающей влияние шага ступни на объем стружки. Опустив ее на ось шага ступни, получим оптимальное значение шага ступни для определенных условий работы фрезы.

Проанализируем формулу (4) и определим, от каких факторов зависит значение оптимального шага ступни для следующих уровней и интервалов варьирования факторов (таблица).

Параметры и режимы работы фрезы влияют на оптимальную величину шага ступни (рис. 4).

Количество ножей в одной секции и ширина захвата ножа не влияют на величину оптимального шага зубьев. С увеличением радиуса барабана оптимальный шаг зубьев повышается по параболической зависимости и составляет $7 \cdot 10^{-3}$ м при оптимальном значении радиуса барабана в диапазоне 0,2-0,3 м, и $9 \cdot 10^{-3}$ м в диапазоне 0,3-0,4 м соответственно. С увеличением показателя кинематического режима работы фрезы от 2 до 4 оптимальный шаг ступни повышается по параболической зависимости и составляет $7 \cdot 10^{-3}$ м, а в диапазоне от 4 до 6 – $9 \cdot 10^{-3}$ м. С увеличением глубины обработки почвы на 0,05 м оптимальный шаг ступни повышается по линейной зависимости и составляет $25 \cdot 10^{-3}$ м.

Таким образом, наиболее значимым фактором,



влияющим на величину оптимального шага почвообрабатывающей фрезы, является глубина обработки почвы.

Выводы. Выявили отсутствие методик при выборе основных параметров и режимов работы почвообрабатывающих фрез с зубцеобразной формой. Для улучшения параметров и режимов работы требуется новый подход в выборе профиля рабочей поверхности ножа фрезы с целью уменьшения энергоемкости фрезерования и улучшения качества обработки. Определили наиболее прогрессивную форму ножа – зубцеобразную. Подтвердили, что количество ножей в

одной секции и ширина захвата ножа не влияют на величину оптимального шага зубьев. Показали, что с увеличением рабочей скорости фрезы уменьшаются удельные затраты энергии на обработку пласта, а эффективность обработки почвы улучшается. Рассчитали, что увеличением глубины обработки почвы на 0,05 м оптимальный шаг ступни повышается по линейной зависимости и составляет 25·10⁻³ м. На практике данная форма фрезы позволяет при оптимальном шаге ступни получать более высокие значения подталкивающих сил в системе МТА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаджиев П.И., Славкин В.И., Махмутов М.М., Журавлев А.В., Быковский В.С. Применение ресурсосберегающей технологии // *Вестник Российского государственного аграрного заочного университета*. 2014. N16(21). С. 61-64.
2. Махмутов М.М., Быковский В.С. Определение площади стружки при работе почвообрабатывающих фрез // *Тракторы и сельхозмашины*. 2015. N1. С. 27-28.
3. Сахапов Р.Л., Махмутов М.М. Влияние исследуемых факторов на мощность фрезерования // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2015. Т. 17. N2-4. С. 896-899.
4. Гаджиев П.И., Манаенков К.А., Алексеев А.И. Выбор оптимальных параметров и режимов работы фрезы с ножа-

ми зубцеобразной формы // *Наука и образование*. 2019. N2. С. 21.

5. Князьков А.С., Купряшкин В.Ф., Наумкин Н.И. Снижение энергоемкости почвообрабатывающих фрез // *Сельский механизатор*. 2015. N8. С. 5-7.

6. Рамазанова Г.Г., Гаджиев П.И. Результаты полевых исследований почвообрабатывающей фрезы с ножами волнистым профилем // *Вестник Российского государственного аграрного заочного университета*. 2015. N19(24). С. 76-79.

7. Драняев С.Б., Чаткин М.Н., Овчинников В.А. Нагружение винтового ножа почвообрабатывающей фрезы в зависимости от угла установки лезвия // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2017. N7-2. С. 38-41.

REFERENCES

1. Gadzhiev P.I., Slavkin V.I., Makhmutov M.M., Zhuravlev A.V., Bykovskiy V.S. Primenenie resursosberegayushchey tekhnologii [Application of resource-saving technologies]. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo agrarnogo zaochnogo universiteta*. 2014. N16(21). 61-64 (In Russian).
2. Makhmutov M.M., Bykovskiy V.S. Opredelenie ploshchadi struzhki pri rabote pochvoobrabatyvayushchikh frez [Determination of the area of surface particles resulting from the operation of rotary tillers]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2015. N1. 27-28 (In Russian).
3. Sakhapov R.L., Makhmutov M.M. Vliyanie issleduyemykh faktorov na moshchnost' frezerovaniya [Influence of the studied factors on the capacity of rotary tillage]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2015. Vol. 17. N2-4. 896-899 (In Russian).
4. Gadzhiev P.I., Manaenkov K.A., Alekseev A.I. Vybora optimal'nykh parametrov i rezhimov raboty frezy s nozhami zubtseobraznoy formy [Selecting optimal parameters and operation

modes of a rotary tiller with serrated-type knives]. *Nauka i obrazovaniye*. 2019. N2. 21 (In Russian).

5. Knyaz'kov A.S., Kupryashkin V.F., Naumkin N.I. Snizhenie energoemkosti pochvoobrabatyvayushchikh frez [Reducing the energy intensity of rotary tillers]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2015. N8. 5-7 (In Russian).

6. Ramazanova G.G., Gadzhiev P.I. Rezul'taty polevykh issledovaniy pochvoobrabatyvayushchey frezy s nozhami volnistym profilem [Field study results of rotary tillers with knives of a scalloped profile]. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo agrarnogo zaochnogo universiteta*. 2015. N19(24). 76-79 (In Russian).

7. Dranyaev S.B., Chatkin M.N., Ovchinnikov V.A. Nagruzhenie vintovogo nozha pochvoobrabatyvayushchey frezy v zavisimosti ot ugla ustanovki lezviya [Loading a screw knife of a rotary tiller depending on the blade installation]. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2017. N7-2. 38-41 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 03.04.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 03.04.2019

Статья принята к публикации 25.05.2019
The paper was accepted
for publication on 25.05.2019