

10. Mukhamad'yarov F. F. Voprosy energoresursosberezheniya v rasteniyevodstve (Issues of energy conservation in crop production), Vladimirsky zeledelets, 2010, No. 3, pp. 10-14.
11. Multifunctional tillage unit: pat. 2679700 RU, № 2018110972; date of submission 27.03.2018; date of publication 13.04.2020, Bull. No. 11. 10 p.
12. Yudkin V. V., Katrich A. I. Racional'naya skhema rasstanovki rabochih organov ploskorezov-glubokoryhlitelej (Rational scheme of the arrangement of the working bodies of blade cultivator), Tekhnika v sel'skom hozyajstve, 1987, No. 3, pp. 28-29.
13. Trufanov V. V. Glubokoye chizelevaniye pochvy (Deep chiseling of soil), M., Agropromizdat, 1989, 140 p.
14. Lur'ye A. B., Lyubimov A. I. Shirokozakhatnyye pochvoobrabatyvayushchiye mashiny (Wide-range tillage machines), L., Mashinostroenie, 1981, 270 p.
15. Nurizyanov R. R. Sovershenstvovanie konstruktivno-tekhnologicheskoy skhemy i optimizatsiya osnovnyh parametrov pluga-ploskoreza pri bezotval'noj obrabotke pochvy (Perfection of the constructive-technological scheme and optimization of the basic parameters of the plough-blade cultivator at moldless tillage), dis. ... kand. tekhn. nauk, Kirov, 2008, 176 p.
16. Demshin S. L. Tekhnika dlya resursosberegayushchey tekhnologii osnovnoy obrabotki pochvy (Technique for resource-saving technology of basic tillage), Dostizheniya nauki i tekhniki APK, 2010, No.7, pp. 67-68.
17. Sineokov G. N., Panov I. M. Teoriya i raschyot pochvoobrabatyvayushchih mashin (Theory and calculation of soil-cultivating machines), M., Mashinostroenie, 1977, 328 p.
18. Burchenko P. N. Mekhaniko-tekhnologicheskiye osnovy pochvoobrabatyvayushchikh mashin novogo pokoleniya (Mechanical and technological foundations of new generation soil cultivation machines), M., VIM, 2002, 212 p.

DOI 10.24411/2307-2873-2020-10041

УДК 631.363

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ МОЛОТКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ПОДАЮЩИМ БУНКЕРОМ

В. Г. Мохнаткин, д-р техн. наук, профессор;

М. С. Поярков, канд. техн. наук, доцент;

Р. М. Горбунов, канд. техн. наук,

ФГБОУ ВО Вятская ГСХА,

Октябрьский проспект, 133, Киров, Россия, 610017

E-mail: Mohnatkin@vgsha.info

Аннотация. Представлены результаты исследований разработанного в Вятской ГСХА молоткового измельчителя грубых кормов. Отличительной особенностью агрегата является конструкция горизонтального подающего бункера. Кроме того, дан подробный анализ существующего состояния данного направления по созданию как измельчителей грубых кормов, так и в целом кормоприготовительной техники. Исследования проведены с использованием современных методов математического моделирования с проведением как

однофакторных экспериментов, так и многофакторных, адаптированных к конкретным условиям. Констатировано, что созданием измельчителей грубых кормов занималось не одно поколение ученых (Алешкин В. Р., Сысуев В. А., Мельников С. В., Вагин Б. И., Трутнев М. А., Савиных П. А., Мохнаткин В. Г., Поярков М. С., Косолапов Е. В., Солонщиков П. Н. и многие другие). Однако, как показывает практика, в этом направлении еще предстоит огромная работа как в теоретическом, так и в практическом плане, включая развитие апробированных и разработку новых методов исследований, в том числе используя и опираясь на работы зарубежных коллег. По результатам экспериментальных исследований измельчителя получены математические зависимости таких показателей, как производительность, энергоемкость, качественные показатели установки в зависимости от количества молотков на роторе. Методом планирования эксперимента найдены оптимальные значения факторов, определяющих производительность измельчителя. Материалы готовы для передачи заинтересованным машиностроительным предприятиям.

Ключевые слова: измельчитель, ротор, молоток, бункер, производительность, питатель, грубые корма, энергоемкость.

Введение. Многочисленные исследования роторных измельчителей с молотковыми рабочими органами доказывают эффективность их функционирования при измельчении различных материалов [1-6]. В то же время для конкретных условий полученных результатов часто бывает недостаточно, так как техника постоянно совершенствуется, а потребители выдвигают свои требования к техническим и технологическим показателям [7-11].

В рационах дойных коров грубый корм занимает более 30%. Как показывает практика, в хозяйствах с фермами на 400...600 коров и 1000 голов на откорме до сих пор не решена проблема комплексной механизации. Обобщение результатов научных исследований по созданию кормоприготовительной техники показывает, что отечественными учеными разработаны и созданы отдельные средства механизации для погрузки основных видов кормов из хранилищ, их накопления, дозирования, смешивания и раздачи животным. Скомплектованные в технологические линии эти машины работают в составе кормоцехов по приготовле-

нию кормовых смесей для различных видов животных [1-5]. Однако кормоцехи, насчитывающие свыше десятка наименований машин, не всегда отвечающих требованиям поточной технологии, имеют большую металлоемкость, энергоемкость процесса и низкую степень унификации оборудования.

На Слободском ремонтно-механическом заводе Кировской области изготовлено 229 измельчителей рулонов грубых кормов по авторскому свидетельству №1381793 (ИРГК «Вятка»), которые нашли широкое распространение на животноводческих фермах как самостоятельная машина, так и в поточных линиях кормоцехов.

Таким образом, развитие и постоянное совершенствование измельчителей кормов, имеющих рабочие органы молоткового типа, на деле подтверждает присущие им положительные качества. Однако проявление положительных свойств данных рабочих органов во многом определяется совместным использованием вспомогательных механизмов и их сочетанием. Например, использование молоткового ротора и вращающегося бункера, молоткового ротора и решета, молотко-

вого ротора и направляющих устройств, то есть проблема повышения эффективности функционирования молотковых рабочих органов требует поиска новых путей ее решения, одним из которых является совершенствование подачи материала к ротору.

Анализ исследований процесса приготовления кормов с использованием молотковых рабочих органов показал, что большинство ученых пришли к мнению, что данные рабочие органы обладают значительными преимуществами перед остальными, особенно по условиям надежности и долговечности. Однако эффективность использования молоткового ротора и измельчителя в целом определяется рядом внешних факторов, таких как физическое состояние измельчаемого материала, способ его подачи, тип подающего органа и условия отвода готового продукта.

Нет единого мнения относительно количества молотков и способа расстановки их на роторе, хотя доказано [2, 3], что с уменьшением шага молотков энергоемкость процесса также снижается. Исследованиями проф. С. В. Мельникова [12] на основе волновой теории разрушения доказано, что стебель считается не защемленным по концам, когда его длина не превышает 0,06...0,07 м. Исходя из этого, можно предположить, что для снижения энергоемкости процесса измельчения расстояние между молотками не следует выбирать более 0,06 м. Помимо частоты вращения бункера на эффективность работы молотковых измельчителей существенное влияние оказывает направление подачи материала по отношению к плоскости вращения ротора и направления вращения последнего. Авторы исследований [2] отмечают, что вращение ротора навстречу движению корма более эффективно, чем по направлению его движения.

Целью исследований является повышение пропускной способности измельчителя грубых кормов с молотковым ротором при получении продукта на выходе, отвечающего зоотехническим требованиям.

Методика. Выпускаемый измельчитель грубых кормов (рис. 1) в заводском исполнении рассчитан на номинальную пропускную способность при измельчении сена или соломы в рулонах до 5 т/ч при общей установленной мощности 40 кВт. В то же время по мере эксплуатации данного агрегата возникла необходимость довести пропускную способность до 10 т/ч. Для этого в конструкцию измельчителя внесен ряд изменений, позволяющих использовать ротор, длина которого увеличена по сравнению с ротором заводского исполнения. Это, в свою очередь, позволило увеличить и количество рядов молотков.

Измельчитель работает следующим образом: исходный материал – сено, солома в тюках, рулонах и россыпью завозятся транспортными средствами в гидрофицированный лоток и, далее транспортером питателя 10 подаются во вращающийся бункер 3, лопасти 5 которого направляют материал к ротору 7 под воздействие молотков 8. Измельченный корм отводится транспортером 11.

Опыты проводили на измельчении соломы озимой ржи в рулонах в два этапа. Сначала был реализован ряд однофакторных экспериментов, позволивший определить оптимальное количество рядов молотков на роторе. После этого с помощью матрицы плана 23 были определены оптимальные значения таких факторов, как частота вращения бункера, длина активной части молотка и количество рядов молотков на роторе при совместном влиянии на критерий оптимизации.

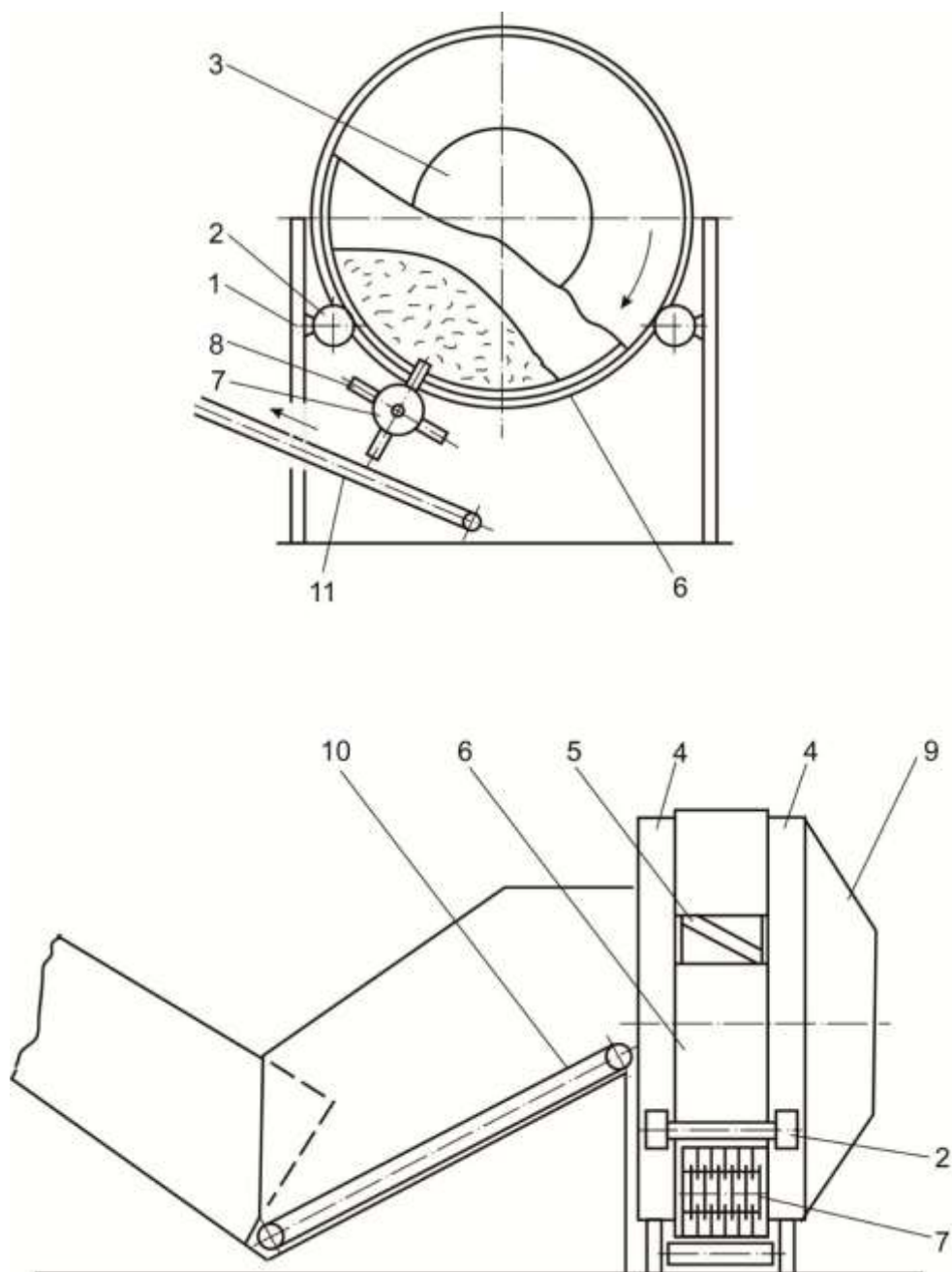


Рис. 1. Схема измельчителя:

1 – рама; 2 – ролики; 3 – бункер; 4 – кольцо; 5 – подающая лопасть; 6 – днище; 7 – ротор; 8 – молоток; 9 – конусная стенка; 10 – транспортер питателя; 11 – выгрузной транспортер

Результаты. На первых этапах экспериментальных исследований была проведена серия однофакторных экспериментов по изучению влияния количества рядов молот-

ков на пропускную способность измельчителя и на удельную энергоёмкость процесса (табл. 1).

Таблица 1

Влияние количества рядов молотков на выходные характеристики измельчителя при $n_{\delta}=7 \text{ мин}^{-1}$ и длине режущей части молотка $\Delta=75 \text{ мм}$

Показатели	Количество рядов молотков			
	5	6	7	8
Пропускная способность, кг/ч	3470	3890	4850	6740
Потребная мощность, кВт	13,48	15,33	17,56	19,42
Удельная энергоёмкость, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$	3,89	3,94	3,65	2,88

Полученные данные аппроксимированы аналитическими выражениями: $Q=1088 \cdot 1,25^K$; $P=3,41+2K$; $\mathcal{E}=6,73 \cdot 0,91^K$ и графически представлены на рисунке 2.

Анализируя данные зависимости, можно сделать вывод о том, что для получения пропускной способности агрегата 10 т/ч на роторе следует установить не менее 10 рядов молотков. При этом необходимо иметь

мощность 23...25 кВт. Однако, с учетом неравномерности загрузки ротора запас мощности должен быть увеличен в 1,5...2,0 раза. Этот существующий недостаток, на наш взгляд, объясняется конструкцией ротора, который имеет большую длину и малый диаметр. Поэтому при перегрузках достаточного запаса кинетической энергии ротор, как маховик, не имеет.

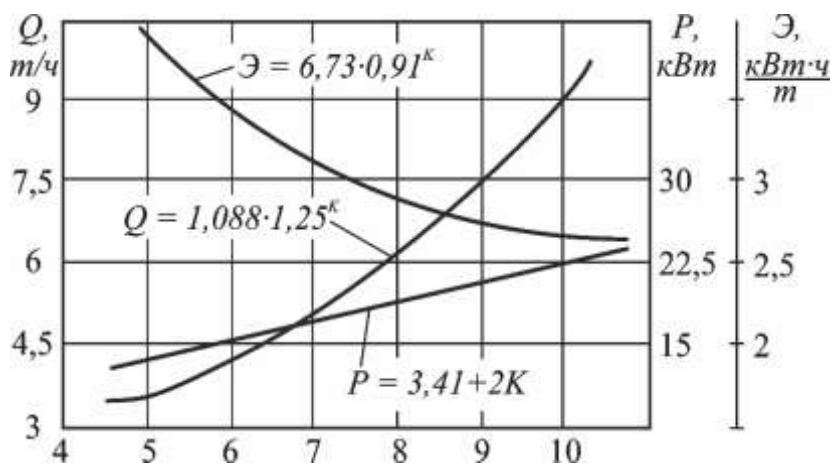


Рис. 2. Влияние количества рядов молотков ротора на выходные характеристики измельчителя

Результаты однофакторных экспериментов показали, что для обеспечения пропускной способности измельчителя (измельчающей головки) 10 т/ч при переработке рулонов необходимо иметь на роторе не менее десяти рядов молотков при длине активной части последних $\Delta=75 \text{ мм}$. Установленная мощность электродвигателя привода ротора должна составлять 40...45 кВт.

На втором этапе исследований для оптимизации конструктивно-режимных параметров измельчителя была реализована матрица плана 23 (табл. 2).

Частота вращения бункера, длина активной части молотка и количество рядов молотков на роторе – эти факторы выбраны на основании ранее проводимых исследований и с учетом результатов однофакторных

экспериментов. В эксперименте средний размер измельченных частиц составляет 20...30 мм при длине частиц исходного материала 350 мм.

В соответствии с методикой планирования эксперимента [12] были рассчитаны оценки коэффициентов регрессии и получено уравнение вида:

$$Y=3,952+0,667X_1+1,320X_2+0,400X_3 - 0,070X_1 \cdot X_2+0,212X_1 \cdot X_3 - 0,041X_2 \cdot X_3$$

Таблица 2

Матрица плана 2³ и результаты эксперимента

Обозначения	Факторы			Критерий оптимизации
	Частота вращения бункера n_{δ} , мин ⁻¹	Кол-во рядов молотков K , шт	Длина активной части молотка Δ , мм	Пропускная способность Q , т/ч
	X_1	X_2	X_3	Y
Уровни варьирования:				
верхний +	7	8	75	
нижний -	3,5	6	50	
Опыты				
1	+	-	+	3,893
2	+	-	-	3,019
3	+	+	-	5,105
4	+	+	+	6,740
5	-	-	+	2,431
6	-	-	-	2,080
7	-	+	-	4,831
8	-	+	+	4,693

В данном уравнении в качестве критерия оптимизации выступает пропускная способность установки.

Статистическая оценка полученного уравнения показала, что с вероятностью 0,95 статистически значимым является фактор X_2 .

В то же время факторы X_1 и X_3 , а также эффект парных взаимодействий всех факторов статистически не значимы.

Поскольку расчетное значение критерия Фишера с вероятностью 0,95 $F_{расч.} = 2,47 < F_{табл.} = 3,0$, то полученное уравнение адекватно представляет рабочий процесс измельчителя.

Так как дальнейшее изменение численного значения исследуемых факторов в сторону их увеличения оказалось невозможным из-за технических ограничений установки (длина ротора ограничена расстоянием между коль-

цами, длина молотков – их прочными характеристиками, частота вращения бункера – надежностью рабочего процесса), было принято решение ограничиться полученным экспериментальным материалом.

Выводы. Разработана конструкция молоткового измельчителя с пропускной способностью 10 т/ч с установленной мощностью 45 кВт. Горизонтальный подающий бункер выполнен из двух колец диаметром 3000 мм. Между кольцами расположен молотковый ротор длиной 750 мм с десятью рядами молотков. Экспериментальным путем определены основные параметры и режимы работы измельчителя. Материалы исследований переданы ПАО «Кировский завод МАЯК» для постановки на производство мобильного измельчителя-раздатчика, созданного в рамках конверсии.

Литература

1. Мохнаткин В. Г., Поярков М. С., Горбунов Р. М. Исследование рабочего процесса роторного измельчителя с осевой подачей материала // Пермский аграрный вестник. 2020. № 2 (30). С. 4-14.
2. Алешкин В. Р., Мохнаткин В. Г. Анализ рабочего процесса молотковых измельчителей грубых кормов // Механизация процессов кормоприготовления и содержания животных: Сборник научных трудов. Пермь, 1988. С. 5-9.
3. Солонщиков П. Н., Косолапов Е. В. Оптимизация основных параметров молоткового измельчителя при приготовлении грубых кормов // Пермский аграрный вестник. 2018. № 1 (21). С. 34-41.
4. Елисеев М. С., Елисеев И. И., Рыбалкин Д. А. Перспективная схема молоткового измельчителя // Аграрный научный журнал. 2017. № 6. С. 54-57.
5. Трутнев М. А., Вагин Б. И., Анисимов В. А. Конусный измельчитель кормов // Сельский механизатор. 2004. № 11. С. 37.
6. Лялин Е. А., Трутнев М. А. Обоснование конструктивных параметров спирально-винтового дозатора с регулированием дозы путем изменения числа оборотов спирали // Пермский аграрный вестник. 2017. № 3 (19). С. 45-50.
7. Мухамадьяров Ф. Ф., Коробицын С. Л., Рубцова Н. Е. Агроэкологическое районирование сельскохозяйственных территорий на микроуровне // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2015. № 3 (46). С. 20-27.
8. Мухамадьяров Ф. Ф. Вопросы энергоресурсосбережения в растениеводстве // Владимирский земледелец. 2010. № 3. С. 10-14.
9. Savinyh P., Sychugov Yu., Kazakov V., Ivanovs S. Development and theoretical studies of grain cleaning machine for fractional technology of flattening forage grain // Engineering for rural development, Proceedings. 2018. Vol. 17. Pp. 124-130. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N156.
10. Research results of grain shredder by using multiplied method of evaluation / P. A. Savinykh, A. Yu. Isupov, A. Palichyn [et al.] // Agricultural Engineering. 2019. Vol. 23. No. 1. Pp. 81-94. DOI: 10.1515/agriceng-2019-0008.
11. Savinyh P., Shirobokov V., Fedorov O., Ivanovs S. Influence of rotary grain crusher parameters on quality of finished product // Engineering for rural development, Proceedings. 2018. Vol. 17. Pp. 131-136. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N158.
12. Мельников С. В., Алешкин В. Р., Рошин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос, 1980. 168 с.

**INCREASING THE THROUGHPUT OF A HAMMER MILL
WITH A HORIZONTAL FEED HOPPER**

V. G. Mohnatkin, Dr. Tech. Sci., Professor

M. S. Pojrkov, Cand. Tech. Sci., Associate Professor

R. M. Gorbunov, Cand. Tech. Sci.

Vyatka State Agricultural Academy

133, Otyabrskiy Prospect St., Kirov, Russia, 610017

E-mail: Mohnatkin@vgsha.info

ABSTRACT

The article presents the results of theoretical and experimental studies of the hammer shredder of coarse feed developed in the Vyatka State Agricultural Academy. A distinctive feature of the unit is the design of a horizontal feed hopper. In addition, a detailed analysis of the current state of this direction for the creation of both coarse feed shredders and feed preparation equipment in general is given. The research was carried out using modern methods of mathematical model-

ing with both single-factor experiments and multi-factor experiments adapted to specific conditions. It is stated that more than one generation of scientists (Aleshkin V. R., Sysuev V. A., Melnikov S. V., Vagin B. I., Trutnev M. A., Savinykh P. A., Mokhnatkin V. G., Poyarkov M. S., Rylov A. A., Solonshchikov P. N.) were engaged in the creation of coarse feed shredders and many others), but as practice shows, there is still a lot of work to be done in this direction, both in theoretical and practical terms, including the development of proven and new research methods, including using and relying on the work of foreign colleagues. Based on the results of experimental studies of the shredder, mathematical dependences of such indicators as productivity, energy consumption, and quality indicators of the installation depending on the number of hammers on the rotor are obtained. The optimal values of factors that determine the performance of the shredder were found using the experiment planning method. The materials are ready for transfer to interested machine-building enterprises.

Key words: shredder, rotor, hammer, hopper, productivity, feeder, straw, energy consumption.

References

1. Mokhnatkin V. G., Poyarkov M. S., Gorbunov R. M. Issledovanie rabocheho protsessa rotornogo izmel'chitelya s osevoi podachei materiala (Investigation of the working process of a rotary grinder with axial supply of material), *Permskii agrarnyi vestnik*, 2020, No. 2 (30), pp. 4-14.
2. Aleshkin V. R., Mokhnatkin V. G. Analiz rabocheho protsessa molotkovykh izmel'chitelei grubyykh kormov (Analysis of working process of coarse feed hammer grinders), *Mekhanizatsiya protsessov kormoprigotovleniya i sodержaniya zhivotnykh: Sbornik nauchnykh trudov*, Perm', 1988, pp. 5-9.
3. Solonshchikov P. N., Kosolapov E. V. Optimizatsiya osnovnykh parametrov molotkovogo izmel'chitelya pri prigotovlenii grubyykh kormov (Optimization of the main parameters of the hammer grinder in the preparation of coarse fodders), *Permskii agrarnyi vestnik*, 2018, No. 1 (21), pp. 34-41.
4. Eliseev M. S., Eliseev I. I., Rybalkin D. A. Perspektivnaya skhema molotkovogo izmel'chitelya (Hammer grinder perspective diagram), *Agrarnyi nauchnyi zhurnal*, 2017, No. 6, pp. 54-57.
5. Trutnev M. A., Vagin B. I., Anisimov V. A. Konusnyi izmel'chitel' kormov (Conical fodder grinder), *Sel'skii mekhanizator*, 2004, No. 11, pp. 37.
6. Lyalin E. A., Trutnev M. A. Obosnovanie konstruktivnykh parametrov spiral'no-vintovogo dozatora s regulirovaniem dozy putem izmeneniya chisla oborotov spirali (Substantiation of design parameters of helical-helical dosing device with dose adjustment by changing the number of spiral revolutions), *Permskii agrarnyi vestnik*, 2017, No. 3 (19), pp. 45-50.
7. Mukhamad'yarov F. F., Korobitsyn S. L., Rubtsova N. E. Agroekologicheskoe raionirovanie sel'skokhozyaistvennykh territorii na mikrourovne (Agroecological zoning of agricultural areas at the microlevel), *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*, 2015, No. 3 (46), pp. 20-27.
8. Mukhamad'yarov F. F. Voprosy energoresursosberezheniya v rastenievodstve (Energy conservation issues in crop production), *Vladimirskii zemledelets*, 2010, No. 3, pp. 10-14.
9. Savinykh P., Sychugov Yu., Kazakov V., Ivanovs S. Development and theoretical studies of grain cleaning machine for fractional technology of flattening forage grain, *Engineering for rural development, Proceedings*, 2018, Vol. 17, pp. 124-130. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N156.
10. Research results of grain shredder by using multiplied method of evaluation, P. A. Savinykh, A. Yu. Isupov, A. Palichyn [et al.], *Agricultural Engineering*, 2019, Vol. 23, No. 1, pp. 81-94. DOI: 10.1515/agriceng-2019-0008.
11. Savinykh P., Shirobokov V., Fedorov O., Ivanovs S. Influence of rotary grain crusher parameters on quality of finished product, *Engineering for rural development, Proceedings*, 2018, Vol. 17, pp. 131-136. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N158.
12. Mel'nikov S. V., Aleshkin V. R., Roshchin P. M. Planirovanie eksperimenta v issledovaniyakh sel'skokhozyaistvennykh protsessov (Planning an experiment in agricultural process research), L., Kolos, 1980, 168 p.