

3. Fedorenko I.Ia. Modelirovanie udarnogo nagruzheniia sloia kormovogo materiala / I.Ia. Fedorenko, A.A. Smyshliaeva. – Tekst neposredstvennyi // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2015. – No. 5. – S. 136-141.

4. Fedorenko I.Ia. Reologicheskaia model edinichnoi chastitsy furazhnogo zerna/ I.Ia. Fedorenko, A.M. Levin, A.V. Tabaev. – Tekst: neposredstvennyi // Teoriia i praktika sovremennoi agrarnoi nauki: sb. III Natsionalnoi (Vserossiiskoi) nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (g. Novosibirsk, 28 fevralia 2020 g.): T. 2 / Novosib. gos. agrar. un-t. – Novosibirsk: ITsNGAU «Zolotoi kolos», 2020. – S. 476-479.

5. Fedorenko, I., Levin, A., Tabaev, A. (2020). Modeling Elastic and Dissipative Properties of Feed Grain Subjected to Vibration. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 941. 012046. DOI: 10.1088/1757-899X/941/1/012046.

6. Batuev G.S. Inzhenernye metody issledovaniia udarnykh protsessov / G.S. Batuev i dr. – Moskva: Mashinostroenie, 1977. – 240 s. – Tekst: neposredstvennyi.

7. Panovko, Ia.G. Vvedenie v teoriuu mekhanicheskikh kolebanii / Ia.G. Panovko. – Moskva: Nauka, 1991. – 256 s. – Tekst: neposredstvennyi.



УДК 631.3632.001.57

**У.К. Сабиев, В.В. Садов**  
**U.K. Sabiyev, V.V. Sadov**

## ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА

### FEEDING GRAIN GRINDER EFFICIENCY INDICES

**Ключевые слова:** фуражное зерно, измельчитель, гранулометрический состав, модуль помола, удельная энергоёмкость.

Наиболее важным способом обработки зерновых кормов является измельчение. Серийно выпускаемые дробилки молоткового типа имеют ряд существенных недостатков: большая энергоёмкость и значительный процент переизмельченного материала. Несмотря на эти недостатки из-за своей простоты конструкции и надежности эти измельчители занимают значительную часть производственных мощностей. Способы резания лезвием дают лучшие показатели по степени измельчения и энергоёмкости. Однако из-за сложности конструкции их применение ограничено. Эти дробильные машины заслуживают особого внимания, в основу которых заложен метод измельчения с использованием

так называемого «защемленного» удара лезвием по зерновке. Они позволяют измельчать культуры, которые требуют особых условий, например, с высокой маслянистостью, мелкосеменные и другие. Предложены рабочие органы измельчителя с оптимальными углами резания для 1-й ступени, равной 30°, для 2-й ступени, равной 35°. Представлены результаты экспериментальных исследований предлагаемого измельчителя фуражного зерна с режущими элементами оригинальной формы. Отмечено, что для предлагаемого измельчителя удельная энергоёмкость снизилась в среднем на 11,9%, однородность гранулометрического состава готового продукта повысилась на 5-10%, количество пылевидной фракции снизилось на 10-15%, и отсутствуют целые зёрна в готовом продукте. Влажность измельчаемого материала оказывает существенное влияние на удельную энергоёмкость процесса измель-

чения: при росте влажности зерновых культур потребление энергии на процесс измельчения повышается, однако тенденция снижения энергоемкости процесса измельчения сохраняется. Полученные данные говорят о перспективе применения способов резания зернового материала наравне с ударом.

**Keywords:** *feeding grain, grinder, granulometric composition, grinding module, specific energy consumption.*

The most important way to process grain feeds is milling. Serially produced hammer-type grinders have a number of significant disadvantages: high energy consumption and a significant percentage of over-crushed material. But, despite these shortcomings, due to their design simplicity and reliability, these grinders occupy a significant part of the production capacity. Blade cutting methods give the best performance in terms of the degree of grinding and energy consumption. However, due to the complexity of their design, their use is limited. The grinding machines that deserve special attention are based on the grinding

method by using the so-called "restrained" blade impact on a kernel. They allow grinding the crops that require special conditions as highly oil-bearing, small-seeded ones, etc. The working bodies of the grinder with optimal cutting angles for the first stage equal to 30°, for the second stage equal to 35° are proposed. The results of experimental studies of the proposed feeding grain grinder with cutting elements of the original form are presented. It is noted that for the proposed grinder the specific energy consumption was decreased by an average of 11.9%, the uniformity of the granulometric composition of the finished product increased by 5-10%, the amount of dust fraction decreased by 10-15%, and there were no whole grains in the finished product. The moisture content of the ground material has a significant effect on the specific energy consumption of the grinding process: with increased moisture content of grain crops, the energy consumption for the grinding process increases, but the tendency to reduce the energy consumption of the grinding process remains. The data obtained indicate the prospect of using methods for cutting grain material along with impact.

**Сабиев Уахит Калижанович**, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Омский ГАУ, г. Омск, Российская Федерация, e-mail: uk.sabiev@omgau.org.

**Садов Виктор Викторович**, д.т.н., ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: sadov.80@mail.ru.

**Sabiyev Uakhit Kalizhanovich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Omsk State Agricultural University, Omsk, Russian Federation, e-mail: uk.sabiev@omgau.org.

**Sadov Viktor Viktorovich**, Dr. Tech. Sci., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: sadov.80@mail.ru.

### Введение

Для оценки эффективности процесса измельчения зерновых компонентов применяют определенные показатели, такие как гранулометрический состав, удельная энергоемкость и степень измельчения.

Известно, что одним из наиболее важных способов обработки зерновых кормов является измельчение, которое является энергоемкой и трудоемкой операцией в кормоприготовлении [1].

На сегодняшний день самыми распространенными машинами, применяемыми в агропромышленном комплексе для измельчения фуражных культур, являются молотковые дробилки.

Анализ таких серийно выпускаемых машин показывает, что им присущи большие эксплуатационные расходы, значительная доля переизмельченного материала, неравномерный износ рабочих органов. Кроме того, следует отметить, что технологический процесс требует большого расхода электроэнергии и получения конечного измельченного продукта неоднородного состава [2].

**Цель** исследования – провести сравнительный анализ показателей эффективности процесса измельчения различными рабочими органами.

### Объекты и методы исследований

Многие исследователи, занимающиеся процессом измельчения, отмечают, что этот процесс с помощью резания и скалывания имеет высокую эффективность применения при измельчении различных культур, в том числе мелкосеменных и масличных [3-5].

Разработанный и теоретически обоснованный измельчитель фуражного зерна и масличных культур с элементами криволинейной формы и в дальнейшем при производственных испытаниях доказал свою эффективность [6]. Технологический процесс измельчения протекает следующим образом. Подлежащий измельчению материал подается через загрузочное отверстие к центру роторов. За счет центробежной силы частицы начинают движение в радиальном положении, распределяясь по рабочей зоне. При вращении нижнего ротора происходит разрушение частиц за счет противорезающего ротора с криволинейными поверхностями.

Гипотеза заключается в том, что рабочие органы измельчителя с режущими элементами криволинейной формы за счет изменения коэффициента трения материала о рабочие органы измельчают частицу на 1-й ступени на отдельные элементы, которые под действием силы Кориолиса поворачиваются большей осью в сторону движения и попадают поверхностью реза на рабочие органы 2-й ступени.

### Результаты исследования

По результатам теоретических исследований установлено, что углы резания материала и поверхности среза различны. Поэтому необходимо применять дифференцированный подход при обосновании численных значений углов резания. После 1-й ступени форма отрезанного элемента меняется, что позволяет сделать вывод о изменении положения его в пространстве за счет действующих сил. Здесь можно предположить, что значения углов резания на разных ступенях будут отличаться, в т.ч. при различной влажности измельчаемого материала [7-9].

Эту гипотезу подтверждают результаты проведенных экспериментальных исследований. Они показывают, что имеется значительный эффект в процессе резания при использовании измельчающих элементов в виде криволинейной поверхности, а именно циклоиды [10, 11]. В этом случае разделение зерновок на сегменты на 1-й и 2-й ступенях происходит преимущественно по наименьшему сечению. И это доказывается снижением энергоемкости процесса и получением однородности продукта измельчения выровненного состава.

По результатам проведенных экспериментов получены значения, по которым построены зависимости потребления энергии от разных значений углов клина для 1-й и 2-й ступеней измельчения для различных зерновых культур (рис. 1, 2).

Как видно из представленных зависимостей, минимальное значение потребления энергии происходит при следующих величинах углов резания: для 1-й ступени –  $\beta = 30^\circ$ , 2-й ступени –  $\beta = 35^\circ$  [12].

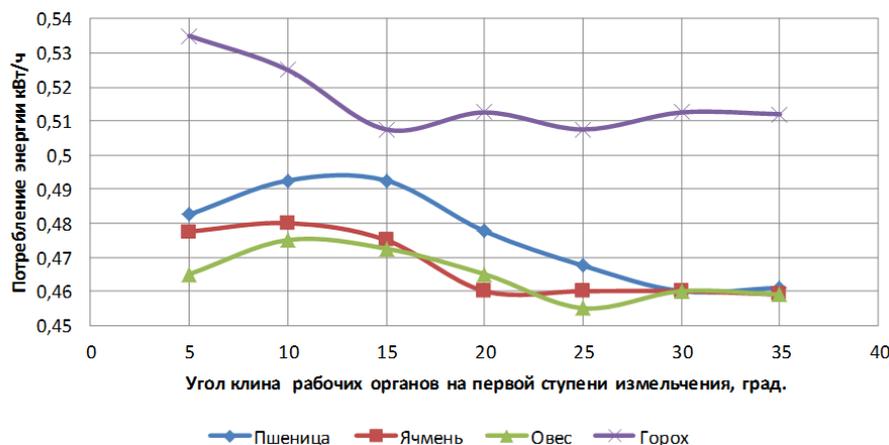


Рис. 1. Энергоемкость процесса от угла клина 1-й ступени

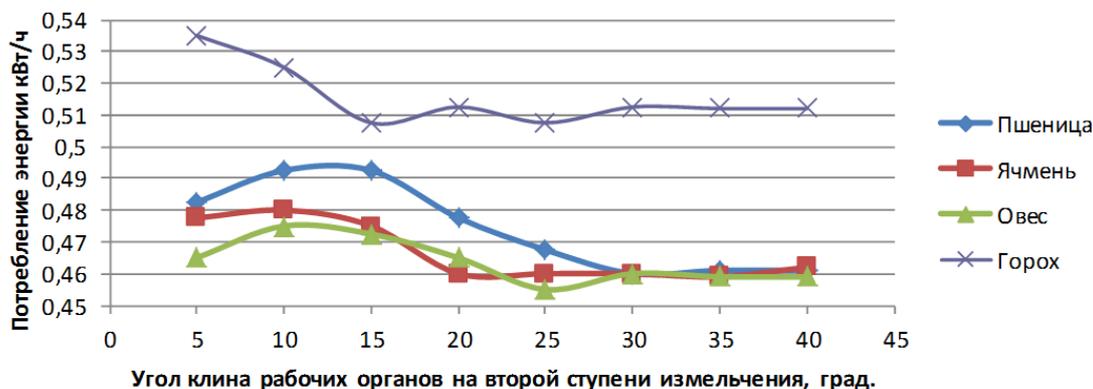


Рис. 2. Энергоемкость процесса от угла клина 2-й ступени

С учетом полученных величин были разработаны и изготовлены рабочие органы с оптимальными углами для разрушения материала, позволяющие за счет выполнения режущих кромок рабочих органов с криволинейной поверхностью получить качество измельчения фуражного зерна, соответствующего зоотехническим требованиям при минимальных затратах энергии на процесс (рис. 3).



Рис. 3. Рабочие органы оригинальной формы

В результате проведенных экспериментов установлено, что для предлагаемого измельчи-

теля с криволинейными режущими элементами удельная энергоёмкость снизилась в среднем на 11,9% (рис. 4, 5).

Как видно из экспериментальных данных, избыточная влажность измельчаемого зернового материала оказывает негативное влияние на процесс измельчения. С увеличением влажности возрастает пластичность частиц, что приводит к увеличению энергоёмкости процесса (рис. 6-9).

Качество готового продукта определялось по ГОСТ ситовым способом. Также по известной методике был определен средневзвешенный диаметр частиц (модуль помола).

Анализ экспериментальных зависимостей показывает, что в результате использования рабочих органов с криволинейной поверхностью при измельчении фуражного зерна наблюдается повышение более выровненного гранулометрического состава смеси. При этом однородность увеличилась на 5-10% и снизился процент переизмельченной фракции на 10-12%, также не наблюдается в готовом продукте целых зерен.

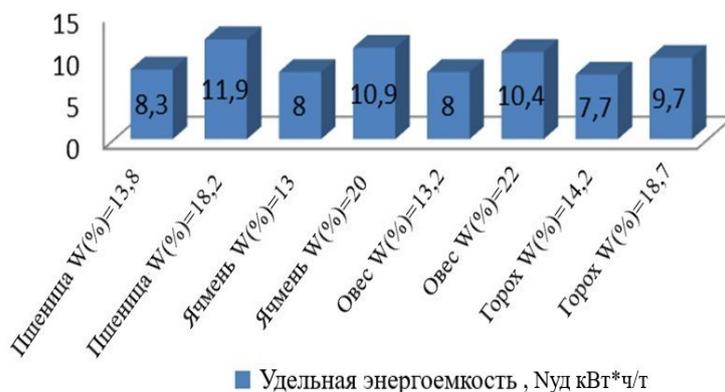


Рис. 4. Удельная энергоёмкость измельчения на серийных рабочих органах

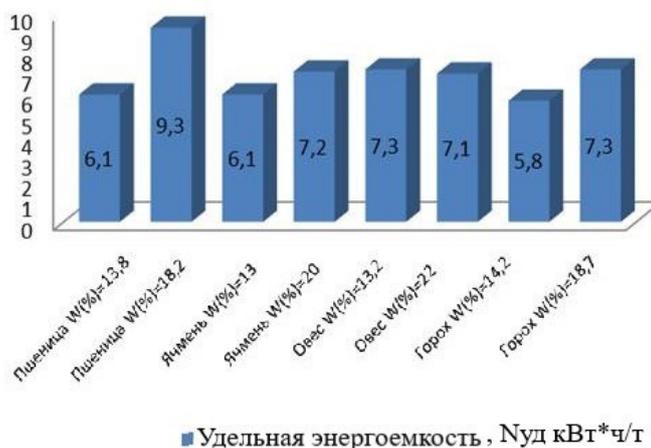
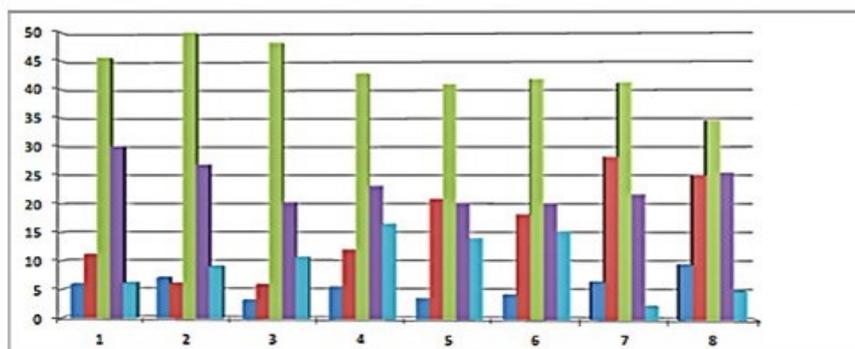
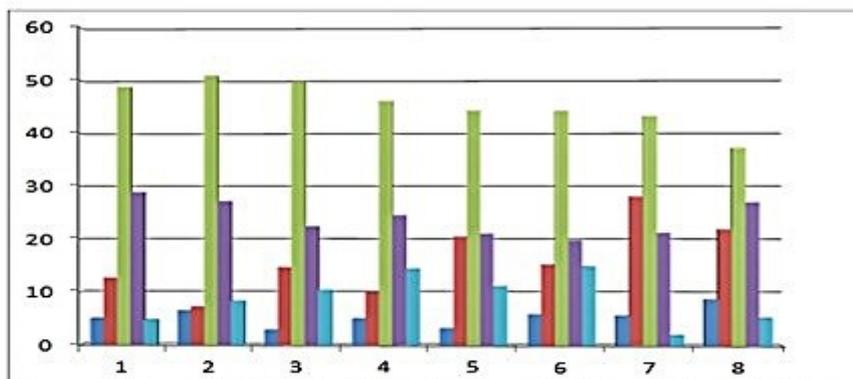


Рис. 5. Удельная энергоёмкость измельчения с криволинейными режущими элементами



	Пшеница W(%)=13,8	Пшеница W(%)=17,8	Ячмень W(%)=12,7	Ячмень W(%)=19,8	Овёс W(%)=13,1	Овёс W(%)=20	Горох W(%)=14,1	Горох W(%)=17,8
$P_0$ -остаток на сборном сите (%)	5,98	7,1	3,2	5,5	3,5	4,2	6,5	9,5
$P_{0,25}$ - ост. На сите с отв. Ø 0,25 мм, (%)	11,2	6,1	5,9	12	20,9	18,2	28,2	25
$P_1$ - ост. На сите с отв. Ø 1 мм, (%)	45,6	49,9	48,1	42,7	40,8	41,7	41	34,5
$P_2$ - ост. На сите с отв. Ø 2 мм, (%)	30,1	26,9	20,3	23,2	20,2	20,1	21,7	25,5
$P_3$ - ост. На сите с отв. Ø 3 мм, (%)	6,2	9,1	10,7	16,5	14	15,2	2,3	5

Рис. 6. Гранулометрический состав на серийных рабочих органах ( $\chi_1=18^\circ$ ,  $\chi_2=18^\circ$ )



	Пшеница W(%)=13,8	Пшеница W(%)=17,8	Ячмень W(%)=12,7	Ячмень W(%)=19,8	Овёс W(%)=13,1	Овёс W(%)=20	Горох W(%)=14,1	Горох W(%)=17,8
$P_0$ -остаток на борном сите, (%)	5	6,4	2,8	5	3,1	3,8	3,6	8,7
$P_{0,25}$ - ост. На сите с отв. Ø 0,25 мм, (%)	12,6	7,2	14,7	10	20,5	15,2	28,1	21,9
$P_1$ - ост. На сите с отв. Ø 1 мм, (%)	48,8	50,9	49,7	46,1	44,3	44,2	43,2	37,2
$P_2$ - ост. На сите с отв. Ø 2 мм, (%)	28,9	27,2	22,4	24,5	21	19,8	21,2	27
$P_3$ - ост. На сите с отв. Ø 3 мм, (%)	4,7	8,3	10,4	14,4	11,1	14,9	1,9	5,2

Рис. 7. Гранулометрический состав на рабочих органах с криволинейной поверхностью

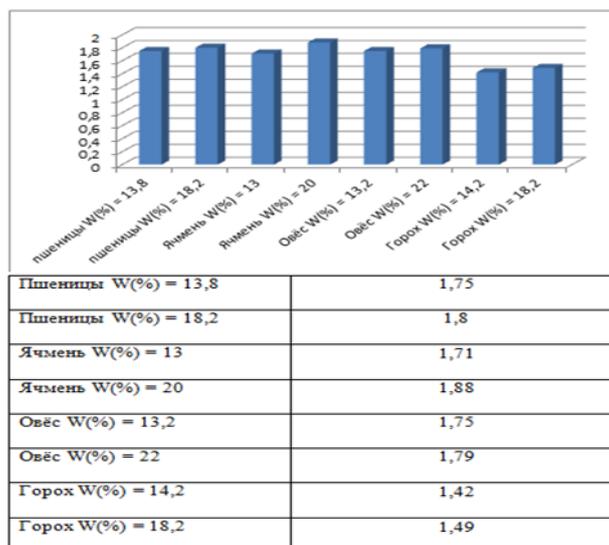


Рис. 8. Модуль помола  $M$  (мм) на серийных рабочих органах ( $\chi_1=18^\circ$ ,  $\chi_2=18^\circ$ )

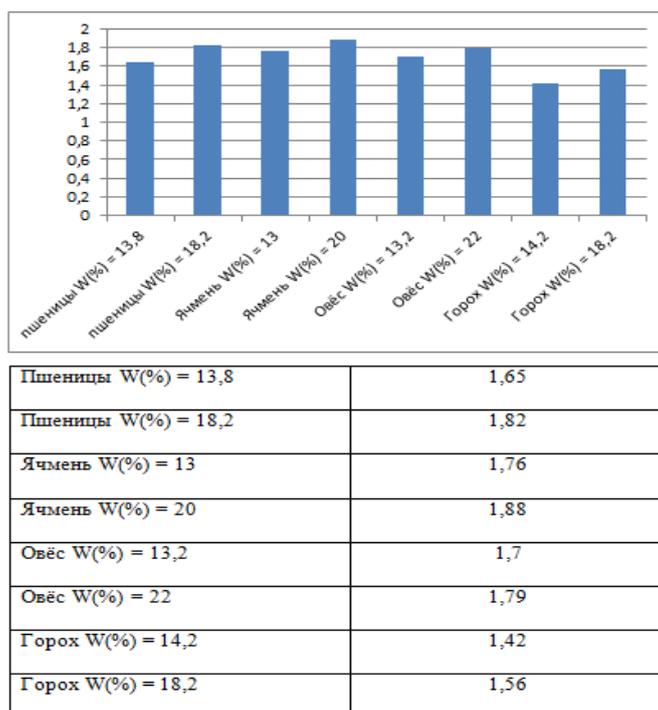


Рис. 9. Модуль помола  $M$  (мм) на рабочих органах с криволинейной поверхностью

### Выводы

1. Наиболее распространенный способ измельчения зернового материала ударом не всегда позволяет получить материал в соответствии с зоотехническими требованиями.

2. За счет использования процесса разрушения зернового материала способом резания происходит повышение однородности гранулометрического состава на 5-10%, при этом идет снижение количества пылевидной фракции на 10-15% за счет отсутствия процесса переизмельчения.

3. На энергоемкость процесса оказывает влияние влажность измельчаемого материала как традиционными рабочими органами, так и с криволинейными поверхностями. При этом во втором случае энергоемкость в целом ниже на 11,9%.

### Библиографический список

1. Sabiev, U., Demchuk, E., Myalo, V., Soyunov, A. (2017). Innovative Equipment and Production Method for Mixed Fodder in the Conditions of Agricultural Enterprises. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 221. 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/221/1/012020.

2. Сабиев, У. К. Сравнительный анализ устройств для измельчения зерновых материалов / У. К. Сабиев, А. С. Пушкарев. – Текст: непосредственный // Вестник Омского государ-

ственного аграрного университета. – 2016. – № 1 – С. 221-226.

3. Сергеев, Н. С. Центробежно-роторные измельчители фуражного зерна: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Сергеев Николай Степанович. – Челябинск, 2008. – 258 с. – Текст: непосредственный.

4. Патент № 162055 РФ. Устройство для измельчения зерновых материалов / Сабиев У. К., Пушкарев А. С., Сабиев И. У., Фомин В. В. – Оpubл. Б.И. № 14. – 2016.

5. Сабиев, У. К. Некоторые закономерности измельчения фуражного зерна при помощи удара лезвием / У. К. Сабиев, Д. Н. Пирожков, И. У. Сабиев. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 12. – С. 132-137.

6. Сабиев, У. К. Измельчитель зерновых материалов / У. К. Сабиев, А. С. Пушкарев. – Текст: непосредственный // Сельский механизатор. – 2018. – № 3. – С. 22-23.

7. Сабиев, У. К. Снижение энергоемкости измельчения зерна в малогабаритном центробежно-роторном измельчителе методом дифференцирования углов резания на первой и последующих ступенях измельчения / У. К. Сабиев, В. В. Фомин. – Текст: непосредственный // Омский научный вестник. – 2011. – № 2 (100). – Серия: Приборы, машины и технологии. – С. 167-170.

8. Sabiev, U., Demchuk, E., Myalo, V., Soyunov, A. (2020). Theoretical Description of Caryopsis Segment Motion in Feed Grain Shredder with Curved Cutting Elements. DOI: 10.2991/assehr.k.200113.159.

9. Сабиев, У. К. Математическая модель движения сегмента зерновки в центробежно-роторном измельчителе фуражного зерна / У. К. Сабиев, В. В. Фомин. – Текст: непосредственный // Достижения науки и техники АПК. – 2010. – № 2. – С. 62-65.

10. Сабиев, У. К. Результаты работы модернизированного измельчителя / У. К. Сабиев, А. С. Пушкарев. – Текст: непосредственный // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2017. – № 4. – С. 245-249.

11. Сабиев, У. К. Универсальный измельчитель для сельскохозяйственного производства / У. К. Сабиев, Н. С. Сергеев. – Текст: непосредственный // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2019. – № 4 (36). – С. 168-175.

12. Сабиев, У. К. Экспериментальное определение геометрических параметров режущих элементов рабочих органов измельчителя фуражного зерна / У. К. Сабиев, А. С. Пушкарев. – Текст: непосредственный // Теория и практика современной аграрной науки: сборник II Национальной (Всероссийской) конференции. – 2019. – С. 237-241.

### References

1. Sabiev, U., Demchuk, E., Myalo, V., Soyunov, A. (2017). Innovative Equipment and Production Method for Mixed Fodder in the Conditions of Agricultural Enterprises. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 221. 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/221/1/012020.

2. Sabiev U.K. Sravnitelnyi analiz ustroystv dlia izmelcheniia zernovykh materialov / U.K. Sabiev, A.S. Pushkarev // Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2016. – No. 1. – S. 221-226.

3. Sergeev N.S. Tsentrobezhno-rotornye izmelchiteli furazhnogo zerna: dis. ... dokt. tekhn. nauk / N.S. Sergeev. – Cheliabinsk, 2008. – 258 s.

4. Patent No. 162055 RF. Ustroistvo dlia izmelcheniia zernovykh materialov / Sabiev U.K., Pushkarev A.S., Sabiev I.U., Fomin V.V. Opubl. B.I. No. 14. 2016.

5. Sabiev U.K. Nekotorye zakonomernosti izmelcheniia furazhnogo zerna pri pomoshchi udara lezviem / U.K. Sabiev, D.N. Pirozhkov, I.U. Sabiev // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – No. 12. – S.132-137.

6. Sabiev U.K. Izmelchitel zernovykh materialov / U.K. Sabiev, A.S. Pushkarev // Selskii mekhanizator. – 2018. – No. 3. – S. 22-23.

7. Sabiev U.K. Snizhenie energoemkosti izmelcheniia zerna v malogabaritnom tsentrobezhno-rotornom izmelchitele metodom differentsirovaniia uglov rezaniia na pervoi i posleduiushchikh stupeniakh izmelcheniia / U.K. Sabiev, V.V. Fomin // Omskii nauchnyi vestnik. Seriya Pribory, mashiny i tekhnologii. – 2011. – No. 2 (100). – S. 167-170.

8. Sabiev, U., Demchuk, E., Myalo, V., Soyunov, A. (2020). Theoretical Description of Caryopsis Segment Motion in Feed Grain Shredder with Curved Cutting Elements. DOI: 10.2991/assehr.k.200113.159.

9. Sabiev U.K. Matematicheskaia model dvizheniia segmenta zernovki v tsentrobezhno-rotornom izmelchitele furazhnogo zerna / U.K. Sabiev., V.V. Fomin // Dostizheniia nauki i tekhniki APK. – 2010. – No. 2. – S. 62-65.

10. Sabiev U.K. Rezultaty raboty modernizirovannogo izmelchitelia / U.K. Sabiev, A.S. Pushkarev // Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2017. – No. 4. – S. 245-249.

11. Sabiev U.K. Universalnyi izmelchitel dlia selskokhoziaistvennogo proizvodstva / U.K. Sabiev, N.S. Sergeev // Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2019. – No. 4 (36). – S. 168-175.

12. Sabiev U.K. Eksperimentalnoe opredelenie geometricheskikh parametrov rezhushchikh elementov rabochikh organov izmelchitelia furazhnogo zerna / U.K. Sabiev, A.S. Pushkarev // Teoriia i praktika sovremennoi agrarnoi nauk: sbornik II Natsionalnoi (Vserossiiskoi) konferentsii. – 2019. – S. 237-241.

