

2. Goncharov V.G. Sokrashchennye sistemy priadeniia khlopka / V.G. Goncharov. – Moskva: Legprombytizdat, 1991. – 110 s.

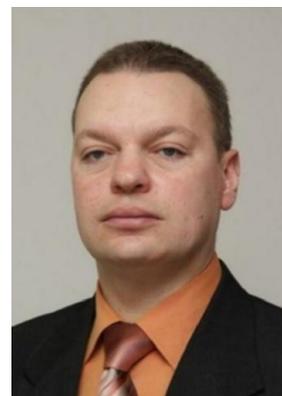
3. <https://www.uster.com/value-added-services/uster-statistics>.

4. Golubev V.S. Analizator nerovnoty lenty. Instruktsiia po ekspluatatsii / V.S. Golubev. – Barnaul: Barnaulskii NII TP, 1987. – 24 s.

5. Sposob opredeleniia toniny volokon. Patent No. 2465582, G01N29/00, 2006 g. Rossiiskaia Federatsiia, MPK G01N29/00 / Kalinin Ts.I., Kunitsyn R.A., Bagaev A.A., FGOU VPO AGAU "Altaiskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet" – No. 2011116334/28, zaiavl. 25.04.2011 g.

6. Bagaev A.A. Rezultaty issledovaniia zavisimosti akusticheskogo davleniia ultrazvukovykh kolebaniy ot massy obraztsa neuporiadochennogo volokonnoho materiala i diametra volokon / A.A. Bagaev, Ts.I. Kalinin, V.G. Rezinov, R.A. Kunitsyn // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2015. – No.3 (125). – S. 117-122.

7. Kalinin Ts.I. Identifikatsiia obiektov avtomatiki s pomoshchiu perekhodnoi i chastotnoi funktsii / Ts.I. Kalinin, R.A. Kunitsyn // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2021. – No. 7. – S. 105-110.



УДК 621.791.92:669.1

DOI: 10.53083/1996-4277-2022-216-10-126-131

М.В. Полковникова, Д.Н. Лященко, А.В. Ишков

M.V. Polkovnikova, D.N. Lyashchenko, A.V. Ishkov

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ МОЛОТКОВ КОРМОДРОБИЛОК С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ

MODELING WEAR OF FEED CRUSHER HAMMERS WITH A VERTICAL AXIS

Ключевые слова: изнашивание, молоток, молотковая дробилка, дробилка с вертикальной осью, рабочий орган, твердость, преимущественная фигура изнашивания, математическая модель.

Предложен один из способов моделирования изнашивания рабочих органов таких кормодробилок – молотков. Преимущественная фигура, формирующаяся при изнашивании молотка кормодробилки, имеет сложную форму, а сам процесс изнашивания дополнительно усугубляется информативной неопределенностью, связанной с неизвестностью (непостоянством) физико-механических свойств измельчаемого материала. Для моделирования процесса изнашивания рабочего органа восстановлена и проанализирована теоретическая траектория перемещения зернового материала под

действием постоянной горизонтальной составляющей тягового сопротивления. Установлено, что изнашивание молотков кормодробилок с вертикальной осью неравномерное, 2-стадийное, что объясняется более сложным характером взаимодействия рабочих органов с измельчаемым материалом; форма преимущественной фигуры изнашивания (вне зависимости от стадии) описывается уравнением параболы: $y=ax^2-bx+c$, постоянные a и b можно легко определить экспериментально, аппроксимируя координаты точек реального профиля. Тяговое сопротивление рабочего органа является интегральным показателем, поэтому предложенный подход моделирования по форме фигуры изнашивания является оптимальным для оценки износа рабочих органов исследованных машин.

Keywords: wear, hammer, hammer crusher, vertical-axis crusher, working tool, hardness, principal wear pattern, numerical model.

This paper proposes one of the ways to simulate the wear of the working tools of feed crushers - hammers. The principal pattern that is formed by the wear of the feed crusher hammer has a complex shape, and the wear process itself is further aggravated by informative uncertainty associated with the unknown (variability) of the physical and mechanical properties of the crushed material. To simulate the wear process of the working tool, the theoretical trajectory of grain material movement under the action of a constant horizontal component of traction resistance is

restored and analyzed. The following has been found: the wear of hammers of feed crushers with a vertical axis is uneven in 2 stages which is explained by the more complex nature of the interaction of working tools with the crushed material; the shape of the principal wear pattern (regardless of the stage) is described by the parabola equation: $y = ax^2 - bx + c$, constants - a and b which may be easily determined experimentally by approximating the coordinates of the real profile points. The traction resistance of the working tool is an integrated index, so the proposed modeling approach based on the shape of the wear pattern is optimal for assessing the wear of the working tools of the studied machines.

Полковникова Марина Викторовна, аспирант, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: polkovnikova.1105@mail.ru.

Лященко Дмитрий Николаевич, ст. преподаватель, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: ldn-ray@yandex.ru.

Ишков Алексей Владимирович, к.х.н., д.т.н., доцент, профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: alekeyyishk@rambler.ru.

Polkovnikova Marina Viktorovna, post-graduate student, Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: polkovnikova.1105@mail.ru.

Lyashchenko Dmitriy Nikolaevich, Asst. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: ldn-ray@yandex.ru.

Ishkov Aleksey Vladimirovich, Cand. Chem. Sci., Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: alekeyyishk@rambler.ru.

Введение

Дробилки с вертикальной осью являются одной из разновидностей высокопроизводительных измельчающих машин и находят применение в горнодобывающей, металлургической и строительной отраслях промышленности, где они используются для измельчения твердых и хрупких материалов. Эти машины содержат меньшее количество деталей, чем более известные дробилки с горизонтальной осью, они не требовательны к размерам исходных кусков измельчаемого материала, имеют более высокую производительность, при равных с аналогами массоразмерных характеристиках позволяют загружать большее количество материала, характеризуются большим числом фракций и меньшим размером их частиц на выходе, имеют и ряд других преимуществ [1, 2].

Кормодробилки с вертикальной осью являются развитием конструкции описанных выше измельчающих машин и оригинальной разработкой коллектива ученых Алтайского ГАУ [3, 4]. С конца 90-х годов они устанавливаются на автоматизированные кормоприготовительные агрегаты «Алтай», различной производительности. Кормодробилки с вертикальной осью показывают высокую надежность, производительность и качество измельчения зерна и других компонентов корма, при их одновременной загрузке в дробилку [5, 6]. Однако существенным

недостатком этих дробилок, как оказалось, является небольшой ресурс (1-2 мес.) и повышенный износ их рабочих органов – молотков [7]. Учитывая высокие требования к балансировке ротора таких дробилок и большое количество молотков, одновременно размешенных стопками на вертикальных секциях ротора – 48 шт. (!), частая смена рабочих органов сильно удорожает эксплуатацию этих дробилок.

Интенсивность износа металлических рабочих органов в абразивной среде зависит от большого количества переменных, имеющих между собой тесную связь [8]. Так, снижение влажности зерна повышает интенсивность изнашивания молотков, следовательно, возрастает давление на рабочие поверхности и скорость скольжения частиц по ним, а непрерывно меняющиеся силы на поверхности трения, сложная динамика взаимодействия рабочей поверхности и частиц измельчаемого зерна дополнительно усложняют описание процесса износа [9-12].

Исследование и математическое описание изнашивания молотков кормодробилок с вертикальной осью позволит не только улучшить эксплуатационные показатели этих машин, но и моделировать указанный процесс в динамике, определять предельно допустимые износы, при которых происходит нарушение технологии дробления зерна, разрабатывать конструкцию

упрочняющего покрытия и технологию его нанесения.

Цель работы – разработать математическую модель формирования профиля преимущественной фигуры изнашивания молотков кормодробилок с вертикальной осью, определить ее вид, проверить адекватность модели.

Экспериментальная часть

Новые молотки кормодробилки представляют собой детали в форме плоских прямоугольных пластин 150×50×5 мм, выполненные из стали 65Г (ГОСТ 14959-2016) и термообработанных до твердости 48-52 HRCэ, с парой симметрично расположенных от средней линии детали отверстий, для закрепления на оси секции и разворота при эксплуатации.

Изнашивание молотков экспериментально исследовали весовым и размерным методами, определяя и сравнивая массу и характерные размеры (форму) изношенных деталей с новыми, принятыми за стандарт. Взвешивание новых и изношенных деталей производили на технических весах CAS-1200 (Швеция), с точностью ±0,1 г, измерение характерных размеров деталей – с помощью штангенциркуля ШЦЦ I-150-0,01 (ЕРМАК, КНР), с тарированной точностью ±0,03 мм.

Также определяли форму фигуры изнашивания деталей с помощью фиксации абрисов наиболее показательных образцов на миллиметровой бумаге (ГОСТ 334-73).

Результаты и их обсуждение

Изношенный молоток кормодробилки имеет форму сложной фигуры, полученной из-за частичной потери материала детали, вследствие постоянного абразивного и ударного взаимодействия с измельчаемым материалом, уноса и коррозии (рис. 1).

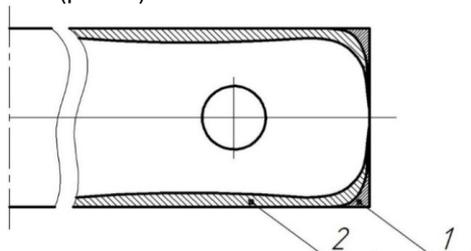


Рис. 1. Форма изношенной части молотка кормодробилки:

зона 1 – первый этап износа;

зона 2 – второй этап износа рабочего органа

Аналитическое решение задачи по моделированию изнашивания молотка кормодробилки

сложное, кроме того, в процессе работы кормодробилки изменяются свойства и самого измельчаемого материала. Однако для упрощения можно воспользоваться уже реализованными моделями похожих процессов изнашивания рабочих органов, у которых формируется аналогичная геометрическая форма поверхности, например, в модели изнашивания долот чизельного плуга, предложенной авторами в работах [13, 14].

Были приняты следующие допущения: процесс износа молотка можно представить в виде двух этапов (рис. 1); износ молотка (из-за особенностей эксплуатации, смены направления вращения) – симметричный, может описываться схожими уравнениями для обеих полуплоскостей; минимум энергия соответствует форме преимущественной фигуры изнашивания, при которой нормальная реакция поверхности молотка – R (горизонтальная составляющая тягового сопротивления) стремится к минимуму или к нулю (рис. 2).

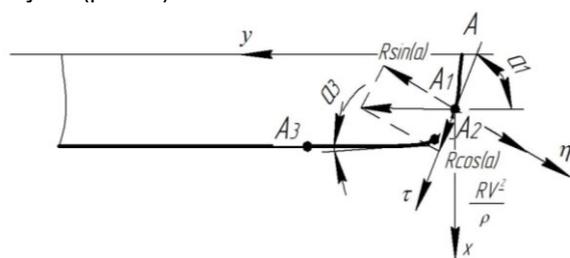


Рис. 2. К выводу уравнений модели изнашивания (схема сил, действующих на зерновой материал, движущийся поперек полуплоскости рабочего органа)

Для моделирования процесса износа молотка рассмотрим перемещение частицы (кормовой материал, зерно) под действием постоянной силы R по кратчайшей реальной траектории (из точки A в точку A_1).

В момент $t=t_1$ дифференциальные уравнения движения точки в проекциях на выбранные оси (τ, η) запишем в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = R \cos \alpha \\ N = 0 = R \sin \alpha - R \frac{v^2}{\rho} \\ \sin \alpha - \frac{v^2}{\rho} = 0 \end{cases}$$

Проведем анализ уравнений движения по очереди, замечая, что:

$$\cos \alpha = \frac{dy}{ds'}$$

где s – траектория частиц.

Тогда для первого уравнения получим:

$$\frac{dv}{dt} = R \frac{dy}{ds}$$

или после преобразования:

$$\frac{dv ds}{dt} = R dy.$$

Если принять, что

$$\frac{ds}{dt} = v,$$

разделяя переменные и интегрируя обе части уравнения, имеем:

$$\int_{v_0}^v v dv = R \int_{y_0}^y dy.$$

При начальных условиях ($t=0$; $v=u_0$, $y=y_0$) решением уравнения является функция: $v^2 = v_0^2 + 2R(y - y_0)$.

После несложных преобразований, с учетом того, что $\sin \alpha = dx/ds$, а радиус кривизны траектории $\rho = ds/d\alpha$ (рис. 2), получим выражение для квадрата скорости:

$$v^2 = \frac{dx}{ds} \cdot \frac{ds}{d\alpha}$$

или по [13],

$$d\alpha = \frac{y'' dx}{1 + y'^2};$$

$$v^2 = \frac{1 + (y')^2}{y''}.$$

Окончательно, с учетом выкладок авторов [13, 14] выражение для v^2 примет вид:

$$v_0^2 + 2R(y - y_0) = \frac{1 + (y')^2}{y''}$$

или

$$y'' = \frac{1 + (y')^2}{v_0^2 + 2R(y - y_0)}.$$

Заменим переменные ($y' = dy/dx = p$) и перепишем последнее уравнение в виде:

$$\frac{p dp}{1 + p^2} = \frac{dy}{v_0^2 + 2R(y - y_0)}.$$

Взяв неопределенный интеграл, получим общее решение в виде: $\ln(1 + p^2) = \ln(v_0^2 + 2R(y - y_0)) + c_1$, который, при подстановке начальных условий ($t=0$, $y=y_0$, $p=y'=p_0$), примет форму:

$$\frac{1 + p^2}{1 + p_0^2} = \frac{1}{v_0^2} (v_0^2 + 2R(y - y_0)).$$

Вновь заменим переменные [13, 14], решим полученное уравнение, относительно p , и получим:

$$A = \frac{2R}{v_0^2} (1 + p_0^2);$$

$$B = p_0^2 - \frac{2R}{v_0^2} (1 + p_0^2);$$

$$p^2 = Ay + B; \quad dx = \frac{dy}{\sqrt{Ay + B}}.$$

Интегрируя уравнение при граничных условиях ($t=t_1$, $y=y_1$, $x=x_1$), получим искомую модельную траекторию движения частицы в виде:

$$x = x_1 + \frac{2}{A} \sqrt{Ay + B} - \frac{2}{A} \sqrt{Ay_1 + B}.$$

Последнее уравнение (после потенцирования и группировок) представляет собой не что иное как уравнение параболы: $y = ax^2 - bx + c$.

Тогда центр теоретической параболы таким образом (рис. 2) будет определяться координатами x , y , а постоянные a и b можно определить экспериментально, аппроксимируя координаты точек реального профиля преимущественной фигуры изнашивания молотка, например, полученных с абрисов профиля на «миллиметровке».

На рисунке 3 приведены аппроксимации координат точек профиля реальных фигур изнашивания молотков различных секций, износ которых отвечает различным этапам (рис. 1). Там же представлены и уравнения парабол, наилучшим образом описывающих экспериментальные данные.

Остается открытым вопрос, каким значениям x , y соответствует завершению стадии первого этапа изнашивания молотка, т.е. состоянию, когда уже окончательно сформирована та геометрия его носовой части, при которой затраты энергии минимальные.

Так как коэффициент, входящий в первое слагаемое теоретического уравнения параболы, рассчитывается по минимуму горизонтальной составляющей тягового сопротивления R , то можно предположить, что предложенная модель будет адекватной не только для оценки износа рабочих органов чизельного плуга [13, 14], но и для молотков кормодриловок с вертикальной осью, измельчающих различные по физико-механическим свойствам зерновые материалы, премиксы, корнеплоды и их смеси.

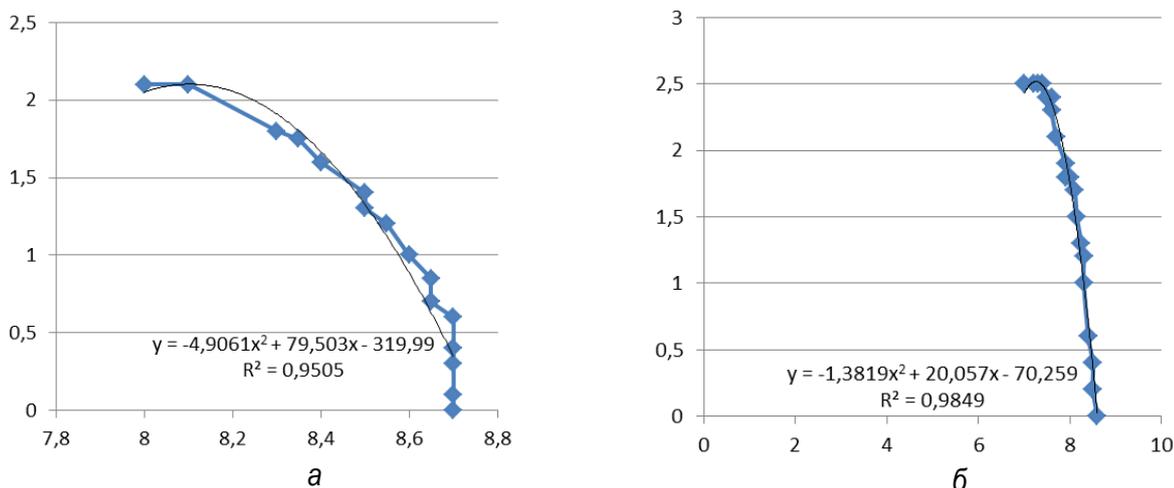


Рис. 3. Абрис носовой части изношенных молотков и аппроксимация их профиля параболическими зависимостями:
а – молотки 2-, 3-, 4-, 6-, 7- и 8-й секций; б – молотки 5-й секции

Выводы

1. Изнашивание молотков кормодробилок с вертикальной осью неравномерное, что объясняется более сложным характером взаимодействия их рабочих органов с измельчаемым материалом.

2. Изношенный молоток кормодробилки имеет форму сложной фигуры – прямоугольной пластины со скругленными торцом и краями, полученной из-за частичной потерей материала детали, вследствие постоянного абразивного и ударного взаимодействия с измельчаемым материалом, уноса и коррозии, а сам процесс изнашивания молотка двухстадийный.

3. Форма преимущественной фигуры изнашивания (вне зависимости от стадии) описывается одним уравнением параболы: $y = ax^2 - bx + c$, постоянные a и b которой можно определить экспериментально, аппроксимируя координаты точек реального профиля.

Библиографический список

1. Клушанцев, Б. В. Горная энциклопедия: [в 5 томах] / Б. В. Клушанцев; главный редактор Е. А. Козловский. – Москва: Советская энциклопедия, 1985. – Т. 2. – 575 с.
2. Мельников, С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм / С. В. Мельников. – Ленинград: Колос, 1978. – 560 с. – Текст: непосредственный.
3. Патент № 22116721 RU. Дробилка зерна / Желтунов М. Г., Демин В. А., Стрижов В. М. – Текст: непосредственный.
4. Патент РФ № 226298 RU. Измельчитель зерновых и сыпучих материалов / Федоре-

нко И. Я., Левин А. М., Желтунов М. Г. – Текст: непосредственный.

5. Власенко Д. А. Способы снижения износа молотков дробилок ударного действия / Д. А. Власенко. – Текст: непосредственный // Современные материалы, техника и технологии. – 2016. – № 2 (5). – С. 63-68.

6. Петров, А. А. Способ повышения износостойкости молотков кормодробилок / А. А. Петров, В. С. Стеновский. – Текст: непосредственный // Лесотехнический журнал. – 2016. – № 1. – С. 185-191.

7. Федоренко, И. Я. Динамика молотковой дробилки с вертикальной осью вращения ротора / И. Я. Федоренко, В. В. Мозговых. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2004. – № 11 (61). – С. 69-74.

8. Виноградов, В. Н. Изнашивание при ударе / В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, А. Ю. Албагачиев. – Москва: Машиностроение, 1982. – 192 с. – Текст: непосредственный.

9. Исследование взаимодействия частиц с рабочими органами молотковой дробилки / Н. Ф. Баранов, В. Г. Фарафонов [и др.]. – Текст: непосредственный // Пермский аграрный вестник. – 2018. – № 3 (23). – С. 4-10.

10. Поздняков, В. Д. Улучшение работы молотковой дробилки за счет совершенствования её конструктивной схемы / В. Д. Поздняков, А.С. Куспак. – Текст: непосредственный // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2011. – Вып. № 31-1. – С. 45-49.

11. Методика определения теоретической траектории движения зерновки в камере измельчения дробилки зерна ударно-отражательного действия / П. А. Савиных, С. Ю. Булатов [и др.]. – Текст: непосредственный // Вестник НГИЗИ. – 2017. – № 11 (78). – С. 58-66.

12. Соловьев, А. Н. Взаимодействие молотка кормодробилки с зерном и износ его рабочей поверхности / А. Н. Соловьев, О. Н. Моисеев. – Текст: непосредственный // Механизация электрификации сельского хозяйства. – 2001. – № 11. – С. 19-21.

13. Моделирование процесса износа рабочих органов чизельного плуга / В. А. Моторин, Д. С. Гапич, И. Б. Борисенко, Д. Б. Курбанов. – Текст: непосредственный // Трение и износ. – 2020. – Т. 41, № 1. – С. 95-103.

14. Моторин, В. А. Концептуальные основы использования высокоуглеродистых сплавов в технологиях упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Моторин Вадим Андреевич. – Волгоград, 2021. – 39 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Klushantsev B.V. Gornaia entsiklopediia: [v 5 tomakh] / gl. red. E.A. Kozlovskii. – Moskva: Sovetskaia entsiklopediia, 1985. – Т. 2. – 575 s.

2. Melnikov, S.V. Mekhanizatsiia i avtomatizatsiia zhivotnovodcheskikh ferm. – Leningrad: Kolos, 1978. – 560 s.

3. Patent No. 22116721 RU. Drobilka zerna / Zheltunov M.G., Demin V.A, Strizhov V.M.

4. Patent RF No. 226298 RU. Izmelchitel zernovykh i sybuchikh materialov / Fedorenko I.Ia., Levin A.M., Zheltunov M.G.

5. Vlasenko D.A. Sposoby snizheniia iznosa molotkov drobilok udarnogo deistviia // Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii. – 2016. – No. 2 (5). – S. 63-68.

6. Petrov A.A., Stenovskii V.S. Sposob povysheniia iznosostoikosti molotkov kormodrobilok // Lesotekhnicheskii zhurnal. – 2016. – No. 1. – S. 185-191.

7. Fedorenko I.Ia., Mozgovykh V.V. Dinamika molotkovoi drobilki s vertikalnoi osiu vrashcheniia rotora. // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2004. – No. 11 (61). – S. 69-74.

8. Vinogradov, V.N., Sorokin G.M., Albagachiev A.Iu. Iznashivanie pri udare. – Moskva: Mashinostroenie, 1982. – 192 s.

9. Baranov N.F., Farafonov V.G. i dr. Issledovanie vzaimodeistviia chastits s rabochimi organami molotkovoi drobilki // Permskii agrarnyi vestnik. – 2018. – No. 3 (23). – S. 4-10.

10. Pozdnyakov V.D., Kuspakov A.S. Uluchshenie raboty molotkovoi drobilki za schet sovershenstvovaniia ee konstruktivnoi skhemy // Izvestiia Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2011. – No. 31-1. – S. 45-49.

11. Savinykh P.A, Bulatov S.Iu. i dr. Metodika opredeleniia teoreticheskoi traektorii dvizheniia zernovki v kamere izmelcheniia drobilki zerna udarno-otrazhatelnogo deistviia. // Vestnik NГИЗИ. – 2017. – No. 11 (78). – S. 58-66.

12. Solovev A.N., Moiseev O.N. Vzaimodeistvie molotka kormodrobilki s zernom i iznos ego rabochei poverkhnosti // Mekhanizatsiia elektrifikatsiia selskogo khoziaistva. – 2001. – No. 11. – S. 19-21.

13. Motorin V.A., Gapich D.S., Borisenko I.B., Kurbanov D.B. Modelirovanie protsessa iznosa rabochikh organov chizelnogo pluga // Trenie i iznos. – 2020. – Т. 41. – No. 1. – S. 95-103.

14. Motorin V.A. Kontseptualnye osnovy ispolzovaniia vysokouglerodistykh splavov v tekhnologiyakh uprochneniia rabochikh organov pochvoobrabatyvaiushchikh mashin: avtoreferat dis... dok. tekhn. nauk. – Volgograd, 2021. – 39 s.

