



Моделирование динамики вибрационного измельчителя кормового зерна

Николай Михайлович Иванов¹,
член-корреспондент РАН, профессор,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: sibime@sfscs.ru;

Алексей Михайлович Левин¹,
кандидат технических наук, докторант,
e-mail: lev-alex@mail.ru;
Иван Ярославич Федоренко²,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: ijfedorenko@mail.ru

¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, р.п. Краснообск, Новосибирская область, Российская Федерация;

²Алтайский государственный аграрный университет, г. Барнаул, Российская Федерация

Реферат. Отметим возможность реализации вибрационного способа измельчения кормового зерна. Однако предпочтение следует отдавать таким динамическим схемам этих машин, которые способствуют энергосбережению и повышению надежности всей конструкции. В связи с этим заслуживает большого внимания вибрационный измельчитель, предложенный в Патенте RU 2688424C1. (*Цель исследования*) Повысить технический уровень вибрационных измельчителей кормового зерна на основе использования эффектов самосинхронизации вибровозбудителей и антирезонанса рабочих органов. (*Материалы и методы*) Получили математическую модель динамики рабочих органов данного типа вибрационных измельчителей кормового зерна, учитывающую их конструктивные особенности и взаимодействие рабочих органов с технологической средой. (*Результаты и обсуждение*) Установлено, что для эффективного осуществления технологического процесса требуются встречное вращение дебалансных валов и настройка рабочих органов на антирезонансный режим работы. Экспериментально подтверждена стабильная самосинхронизация вибровозбудителей в режиме антирезонанса рабочих органов, хотя фазировка дебалансных валов отличалась от теоретической величины 180 градусов и составляла 168-170 градусов. Такое отклонение не оказывает негативного влияния на технологический процесс измельчения. Следовательно, первоначальная гипотеза о совместном проявлении эффектов самосинхронизации вибровозбудителей и антирезонанса рабочих органов нашла свое теоретическое и экспериментальное подтверждение. (*Выводы*) Получены математические модели динамики рабочих органов вибрационных измельчителей кормового зерна, учитывающие их конструктивные особенности и взаимодействие с технологической средой. Установлено, что для осуществления технологического процесса на эффективном уровне требуются встречное вращение дебалансных валов, приводящее к самосинхронизации вибровозбудителей, и настройка рабочих органов на антирезонансный режим.

Ключевые слова: кормовое зерно, вибрационный измельчитель, самосинхронизация вибровозбудителей, антирезонанс рабочих органов, конструкции вибрационного измельчителя.

■ **Для цитирования:** Иванов Н.М., Левин А.М., Федоренко И.Я. Моделирование динамики вибрационного измельчителя кормового зерна // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №1. С. 46-51. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-46-51. EDN: CGMVUQ.

Scientific article

Simulating Dynamics of Feed Grain Vibration Grinder

Nikolay M. Ivanov¹,
corresponding member of the Russian Academy
of Sciences, professor,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: sibime@sfscs.ru;

Alexey M. Levin¹,
Ph.D.(Eng.), doctoral student,
e-mail: lev-alex@mail.ru;
Ivan Ya. Fedorenko²,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: ijfedorenko@mail.ru

¹Siberian Federal Scientific Center of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, Russian Federation;

²Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation

Abstract. The paper notes the feasibility of a vibration-based method for feed grain grinding. However, preference should be placed on dynamic machine configurations that enhance energy efficiency and increase the overall structural reliability. In this regard, it is worth considering the vibration grinder proposed in Patent RU 2688424C1. (*Research purpose*) The study aims to improve the technical capabilities of feed grain vibration grinders through the utilization of self-synchronization effects in vibration exciters and anti-resonance in working components. (*Materials and methods*) The authors developed a mathematical model for the dynamics of the working bodies in this type of a grain vibration grinder, taking into consideration the design of these bodies and their interaction with the technological environment. (*Results and discussion*) The findings show that effective execution of the technological process requires counter-rotating unbalance shafts and fine-tuning the working bodies to operate in an anti-resonance mode. The experiment confirms stable self-synchronization of vibration exciters in the anti-resonance mode of the working bodies, although the phasing of the unbalance shafts deviates slightly from the theoretical 180-degree mark, measuring between 168 and 170 degrees. This deviation does not have an adverse impact on the grinding process. As a result, the initial hypothesis combining the effects of self-synchronization in vibration exciters and anti-resonance in working bodies has received both theoretical and experimental confirmation. (*Conclusions*) It has been established that effective implementation of the technological process necessitates the counter-rotation of unbalance shafts, resulting in the self-synchronization of vibration exciters, and adjustment of the working bodies to an anti-resonance mode.

Keywords: feed grain, vibration grinder, vibration exciters self-synchronization, working bodies anti-resonance, vibration grinder design.

■ **For citation:** Ivanov N.M., Levin A.M., Fedorenko I.Ya. Simulating dynamics of feed grain vibration grinder. *Agricultural machinery and technologies*. 2024. Vol. 18. N1. 46-51 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-46-51. EDN: CGMVUQ.

Как показали ранее проведенные исследования, вибрационный способ измельчения кормового зерна снижает удельные энергетические затраты в сравнении с молотковой дробилкой [1]. При этом структура измельченного продукта в большей степени отвечает требованиям, сформулированным зоотехнической наукой для жвачных животных.

Вибрационный способ может быть реализован в различных конструкциях измельчителей [2]. Однако предпочтение следует отдавать динамическим схемам машин [3]. Такие системы способствуют энергосбережению и повышению надежности всей конструкции [4].

В связи с этим заслуживает особого внимания вибрационный измельчитель для кормового зерна. Схема его работы приведена на рисунке 1. Близкие по технической сущности измельчители применяются в горном деле (Вайсберг Л.А., Зарогатский Л.П., Туркин В.Я. Вибрационные дробилки. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. 306 с.). Предполагалось, что в этом измельчителе будут проявляться важные для его технического уровня вибрационные динамические эффекты – самосинхронизация вибровозбудителей и антирезонанс [5, 6].

Самосинхронизация механических вибровозбудителей состоит в том, что два или более неуравновешенных роторов, приводимых в движение асинхронными двигателями, на неподвижном основании имеют разные скорости вращения ω_1 и ω_2 [7, 8]. Эти роторы, будучи установленными на общем подвижном основании, вращаются с одинаковой средней скоростью ω и определенной фазировкой.

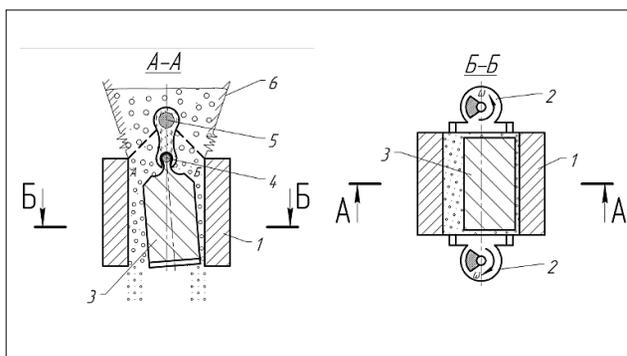


Рис. 1. Схема работы вибрационного измельчителя фуражного зерна

Fig. 1. Operational diagram of a vibrating feed grain shredder

Антирезонанс проявляется в двухмассных колебательных системах и означает неподвижность той массы, на которую действует источник вынужденных колебаний (Блехман И.И. Синхронизация в природе и технике. М.: Наука, 1981. 351 с.).

Рабочие органы вибрационного измельчителя кормового зерна представляют собой активный элемент в виде корзины 1 с установленными на ней вибровозбудителями 2, а также пассивный элемент – массивный маятник 3, который кинематически связан с активным элементом в точке подвеса 4. Активный элемент может совершать угловые колебания в плоскости чертежа, поскольку снабжен шарнирным подвесом 5. Сверху измельчителя установлен бункер 6 с исходным фуражным зерном. В процессе измельчения зерно истекает из бункера и попадает в активные зоны между рабочими органами 1 и 3, под воздействием которых измельчается.

В целом конструкция представляет собой симметричную систему с двумя осями симметрии.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ – повышение технического уровня вибрационного измельчителя кормового зерна на основе использования эффектов самосинхронизации вибровозбудителей и антивибрации рабочих органов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Динамику вибрационного измельчителя изучали на упрощенной расчетной схеме (модели), использование которой оправдано малыми колебаниями системы в вертикальном направлении (рис. 2). Такой подход с рассмотрением лишь горизонтальных колебаний дает исчерпывающую информацию о динамических свойствах данной конструкции.

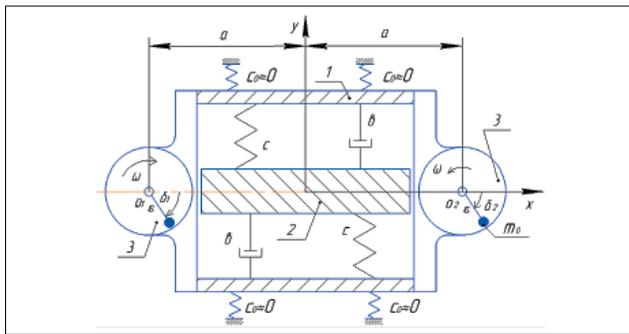


Рис. 2. Расчетная динамическая схема вибрационного измельчителя с двумя самосинхронизирующимися вибровозбудителями

Fig. 2. Calculated dynamic diagram of a vibration grinder with two self-synchronizing vibration exciters

Динамическая модель состоит из несущей системы 1 (корзины), внутри которой расположена подвижная щека 2. К корзине прикреплены два одинаковых дебалансных вибровозбудителя 3 с приводом от асинхронных электродвигателей. Внутренние поверхности несущей системы и поверхности щеки образуют рабочие поверхности измельчителя.

Свойства измельчаемого материала отображают упругие c и вязкие b элементы. При этом элемент b в эквивалентном виде представляет все диссипативные потери в слое измельчаемого материала. Поскольку несущая система совершает малые колебания на подвесках, то считаем, что жесткость поддерживающих элементов c_0 близка к нулю.

Перемещения тел 1 и 2 (корзины и щеки) от положения равновесия описываются координатами x и y их центров масс. Положения дебалансов описываются углами δ_1 и δ_2 , отсчитываемых от оси x . Угловые колебания всей системы относительно центра масс характеризуется углом φ .

В целом рассматриваемая расчетная модель является симметричной и центрированной, что упрощает самосинхронизацию вибровозбудителей.

В первом приближении считаем, что дебалансные валы вращаются равномерно по закону:

$$\delta_1 = q_1 \omega t; \delta_2 = q_2 (\omega t + \alpha), \quad (1)$$

где q_1 и q_2 – условные величины, характеризующие направление вращения дебалансных валов; α – фазовый сдвиг между вращениями дебалансов.

Уравнения колебаний системы в целом и отдельных элементов измельчителя имеют вид:

$$M\ddot{x} = \Phi_0 \cdot [q_1 \cos \omega t + q_2 \cos(\omega t + \alpha)]; \quad (2)$$

$$I\ddot{\varphi} = \Phi_0 a \cdot [q_1 \sin \omega t - q_2 \sin(\omega t + \alpha)]; \quad (3)$$

$$M_1 \ddot{y}_1 + c(y_1 - y_2) + b(\dot{y}_1 + \dot{y}_2) = -\Phi_0 [q_1 \sin \omega t + q_2 \sin(\omega t + \alpha)]; \quad (4)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 - c(y_1 - y_2) - b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = 0, \quad (5)$$

где m_1, m_2, m_0 – массы тел 1, 2 и дебаланса вибровозбудителя;

$$M = m_1 + m_2 + 2m_0;$$

$$M_1 = m_1 + 2m_0;$$

$$\Phi_0 = m_0 \epsilon \omega^2;$$

ϵ – эксцентриситет дебаланса;

a – расстояние от центра масс системы до осей вращения дебалансов;

I – момент инерции системы относительно центра ее масс;

c и b – коэффициенты, соответственно жесткости и сопротивления зернового слоя, находящегося в полости измельчения (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Теория и практика показывают, что возможны два режима синхронизации: $\alpha=0$ (синфазное вращение валов дебалансов) и $\alpha=\pi$ (противофазное вращение валов дебалансов) [9]. В обоих случаях нас интересует встречное вращение дебалансов, при котором

$$q_1 = 1; q_2 = -1. \quad (6)$$

Исследуем первый режим синхронизации с $\alpha=0$. Подставляя это условие, а также значения (6) в уравнения (2)-(5), будет:

$$M\ddot{x} = 2\Phi_0 \cos \omega t; \quad (7)$$

$$I\ddot{\varphi} = 2\Phi_0 a \sin \omega t; \quad (8)$$

$$M_1 \ddot{y}_1 + c(y_1 - y_2) + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = 0; \quad (9)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 - c(y_1 - y_2) - b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = 0. \quad (10)$$

Как следует из этих уравнений, данный режим синхронизации для вибрационного измельчителя явно не подходит, поскольку исчезает вынуждающая сила по направлению оси y . В то же время возникают паразитные колебания вдоль оси x , а также угловые вокруг центра масс.

Рассмотрим режим противофазной синхронизации, для которой $\alpha = \pi$:

$$M\ddot{x} = 0; \quad (11)$$

$$I\ddot{\varphi} = 0; \quad (12)$$

$$M_1\ddot{y}_1 + c(y_1 - y_2) + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = -2\Phi_0 \sin \omega t; \quad (13)$$

$$m_2\ddot{y}_2 - c(y_1 - y_2) - b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = 0. \quad (14)$$

В этом случае движения рабочих только поступательные вдоль оси y , в том числе взаимные, что отвечает технологическим требованиям процесса измельчения. Паразитные колебания отсутствуют.

Известно, что реализуется тот вид синхронизации, который устойчив. И.И. Блехман показал, что для подобных рассматриваемому измельчителю симметричных динамических систем при встречном вращении дебалансных валов всегда устойчив именно режим с $\alpha = \pi$ (Блехман И.И. Синхронизация в природе и технике. М.: Наука, 1981. 351 с.). При этом к другим параметрам системы требования минимальные:

$$2a \neq 0. \quad (15)$$

Условие (15) заведомо выполняется в данном измельчителе.

Рассмотрим отдельно уравнения (13) и (14). Они характеризуют требуемые для измельчения зерна прямолинейные, в том числе взаимные, колебания рабочих органов как двухмассной системы. Желательно, чтобы в процессе работы измельчителя несущая система с вибровозбудителями (тело 1 на рис. 2) совершала минимальные абсолютные колебания, а пассивное тело 2 – максимальные колебания. При этом имеет место взаимное перемещение данных тел (рабочих органов), что гарантирует измельчение зерна.

В то же время на вибровозбудители действуют минимальные инерционные нагрузки, что удлиняет срок их работы, снижает виброактивность машины в целом, уменьшает излучаемый шум. Речь идет здесь как раз об использовании эффекта антирезонанса.

Решения уравнений (13) и (14) в силу их линейности хорошо известны и для амплитуд колебаний тел 1 и 2 (корзины и щеки) будут в наших обозначениях таковыми:

$$A_1 = 2\Phi_0 \sqrt{\frac{(c - m_2\omega^2)^2 + b^2\omega^2}{\Delta^2 + \Delta_1^2}}; \quad (16)$$

$$A_2 = 2\Phi_0 \sqrt{\frac{c^2 - b^2\omega^2}{\Delta^2 + \Delta_1^2}},$$

где $\Delta = (c_0 + c - m_1\omega^2) \cdot (c - m_2\omega^2) - c^2$;

$$\Delta_1 = b\omega \cdot (c_0 - m_1\omega^2 - m_2\omega^2).$$

Минимальная амплитуда колебаний несущего тела 1 может наступить в том случае, если в числителе (16) будет $(c - m_2\omega^2) = 0$. Из этого следует, что антирезонанс проявляется при частоте возбуждения ω^* , равной парциальной частоте второго тела:

$$\omega^* = \sqrt{\frac{c}{m_2}}.$$

Обеспечение устойчивости околорезонансных колебательных режимов технологических вибромашин и самосинхронизации вибровозбудителей очевидна [10, 11].

Однако одновременные требования самосинхронизации вибровозбудителей и антирезонанса рабочих органов в зерновом измельчителе технически противоречивы. Действительно, для устойчивой самосинхронизации вибровозбудителей необходимы максимальные колебания их общей несущей системы 1, для антирезонанса – ее минимальные колебания. Поэтому встает вопрос о возможности одновременного сосуществования этих эффектов, и в пользу его положительности решения свидетельствует «парадокс неработающих связей» (Блехман И.И. Синхронизация в природе и технике. М.: Наука, 1981. 351 с.). Он заключается в том, что самосинхронизация может наблюдаться даже в отсутствие колебаний общего основания. Но если по каким-то причинам самосинхронизация нарушается, то колебания общего основания мгновенно появляются и самосинхронизация вибровозбудителей восстанавливается.

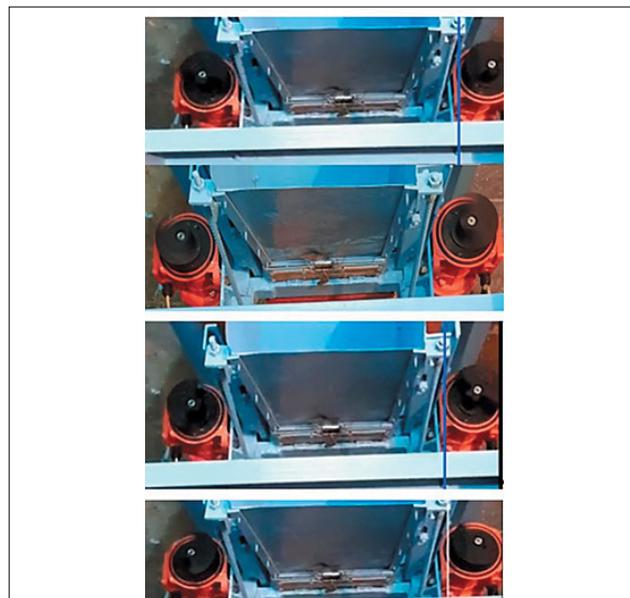


Рис. 3. Взаимное положение дебалансных валов измельчителя в случайные моменты времени (вид сверху): крышки дебалансных валов вибровозбудителей сняты)
Fig. 3. A relative position of the unbalanced shafts in the shredder at random times (top view): the covers of the unbalanced shafts of vibration exciters are removed)

Имеются также публикации по родственным динамическим системам, в которых этот эффект не только подтверждается [12], но и опровергается [13]. Поэтому возникла необходимость опытной проверки выдвинутых нами предположений. В режиме антирезонанса проверяли синхронное вращение дебалансов на экспериментальном образце вибрационного измельчителя кормового зерна производительностью около 200 кг/час. Верхние крышки вибровозбудителей были сняты (рис. 3) и во время работы проводили фотосъемку положения дебалансов.

Анализ фотоснимков показал стабильную самосинхронизацию вибровозбудителей, хотя фазировка дебалансных валов отличалась от теоретических 180° и составляла $168-170^\circ$. Это отклонение не влияет на технологический процесс измельче-

ния. Следовательно, первоначальная гипотеза о совместном проявлении эффектов самосинхронизации вибровозбудителей и антирезонанса рабочих органов нашла свое теоретическое и экспериментальное подтверждение.

Выводы. В работе получены математические модели динамики рабочих органов вибрационных измельчителей кормового зерна, учитывающие их конструктивные особенности и взаимодействие рабочих органов с технологической средой.

Установлено, что для эффективного осуществления технологического процесса требуются встречное вращение дебалансных валов, как условие устойчивой самосинхронизации вибровозбудителей, а также настройка рабочих органов на антирезонансный режим их работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левин А.М. Экспериментальная оптимизация процесса вибрационного измельчения кормового зерна // *Вестник Омского ГАУ*. 2023. N1(49). С. 161-168. DOI: 10.48136/2222-0364_2023_1_161.
2. Федоренко И.Я., Левин А.М., Табаев А.В. Морфологический анализ вибрационных измельчителей кормового зерна // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2020. N1(183). С. 156-163. EDN: NAEPUL.
3. Крупенин В.Л. Ударные и виброударные машины и устройства // *Вестник научно-технического развития*. 2009. N4(20). С. 3-32.
4. Картавий А.Н. Ресурсосберегающие принципы конструирования технологических вибрационных машин // *Горное оборудование и электромеханика*. 2009. N3. С. 28-37. EDN: JXCCRB.
5. Шишкин Е.В., Казаков С.В. Анализ динамики вибрационной конусной дробилки // *Автоматизированное проектирование в машиностроении*. 2015. N3. С. 82-87. EDN: UNRYWX.
6. Shishkin E.V., Kazakov S.V. Application of vibratory-percussion crusher for disintegration of supertough materials. *IOP. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2017. 87 022018. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022018.
7. Kazakov S., Shishkin E. Vibrational dynamic system for the reduction of solid materials/ *Vibroengineering PROCEDIA*. Vol. 25. 2019. 65-69. DOI: 10.21595/vp.2019.20808.
8. Blekhman I.I. Vibrational mechanics: nonlinear dynamic effects, general approach, applications. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2000. 509. DOI: 10.1142/9789812794659.
9. Chunyu Zhao, Bin He, Junjiang Liu, et al. Design method of dynamic parameters of a self-synchronization vibrating system with dual mass. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, Prepublished January 29, 2017. DOI: 10.1177/1464419316689643.
10. Panovko G., Shokhin A. Dynamics features of a resonant vibromachine with self-synchronizing inertial vibroexciters in the presence of vibration limiter. *Journal of Vibroengineering*. 2021. Vol. 23. Iss. 8. 1727. DOI: 10.21595/jve.2021.22127. EDN: TUNZHJ.
11. Drincha V.M., Tsench Yu.S. Fundamentals and prospects for the technologies development for post-harvest grain processing and seed preparation. *Agricultural machinery and technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 17-25. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-17-25.
12. Пановко Г.Я., Шохин А.Е. Некоторые аспекты моделирования динамики резонансных вибромашин // *Вестник научно-технического развития*. 2014. N1(77). С. 25-36. EDN: SNRHKT.
13. Шохин А.Е., Никифоров А.Н. Саламандра К.Б. Экспериментальный анализ колебаний двухмассовой системы с самосинхронизирующимися инерционными вибровозбудителями // *Вестник научно-технического развития*. 2017. N12(124). С. 58-65.

REFERENCES

1. Levin A.M. Experimental optimization of the vibratory grinding process of fodder grain. *Bulletin of Omsk SAU*. 2023. N1(49). 161-168 (In Russian). DOI: 10.48136/2222-0364_2023_1_161.
2. Fedorenko I.Ya., Levin A.M., Tabayev A.V. Morphological analyses of vibration crushers of fodder grain. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2020. N1(183). 156-163 (In Russian). EDN: NAEPUL.
3. Krupenin V.L. Shock and vibration impact machines and devices. *Bulletin of Science and Technical Development*.

2009. N4(20). 3-32 (In Russian).
4. Kartavyu A.N. Resource-saving principles of technological vibration machines construction. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2009. N3. 28-37 (In Russian). EDN: JXCCRB.
 5. Shishkin E.V., Kazakov S.V. Analysis of the dynamics of a vibrating cone crusher. *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii*. 2015. N3. 82-87 (In Russian). EDN: UNRYWX.
 6. Shishkin E.V., Kazakov S.V. Application of vibratory-percussion crusher for disintegration of supertough materials. *Earth Environ. Sci.* 2017.87 022018 (In English). DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022018.
 7. Kazakov S.V., Shishkin E.V., Vibrational dynamic system for the reduction of solid materials. *Vibroengineering PROCEDIA*. Vol. 25. 2019. 65-69 (In English). DOI: 10.21595/vp.2019.20808.
 8. Blekhman I.I. Vibrational mechanics: nonlinear dynamic effects, general approach, applications. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2000. 509 (In English). DOI: 10.1142/9789812794659.
 9. Chunyu Zhao, Bin He, Junjiang Liu, et al. Design method of dynamic parameters of a self-synchronization vibrating system with dual mass. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K. Journal of Multi-body Dynamics*. (In English). DOI: 10.1177/1464419316689643.
 10. Panovko G., Shokhin A. Dynamics features of a resonant vibromachine with self-synchronizing inertial vibroexciters in the presence of vibration limiter. *Journal of Vibroengineering*. 2021. Vol. 23. Is. 8. DOI: 10.21595/jve.2021.22127. EDN: TUNZHJ.
 11. Drincha V.M., Tsench Yu.S. Fundamentals and prospects for the technologies development for post-harvest grain processing and seed preparation. *Agricultural machinery and technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 17-25 (In English). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-17-25.
 12. Panovko G. Ya., Shokhin A.E. Some aspects of modeling the dynamics of resonant vibratory machines. *Bulletin of Science and Technical Development*. 2014. N1(77). 25-36 (In Russian).
 13. Shokhin A.E., Nikiforov A.N., Salamandra K.B. Experimental analysis of oscillations of a twomass system with self-synchronizing inertial exciters. *Bulletin of Science and Technical Development*. 2017. N12(124). 58-65 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Иванов Н.М. – постановка проблемы, научное руководство, анализ экспериментальных результатов;

Федоренко И.Я. – проведение испытаний, анализ экспериментальных испытаний, подготовка материалов к публикации;

Левин А.М. – проведение испытаний, анализ экспериментальных испытаний, подготовка статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Ivanov N.M. – problem statement, scientific guidance, analysis of experimental results;

Fedorenko I.Ya. – testing, analysis of experimental tests, preparation of materials for publication;

Levin A.M. – conducting tests, analyzing experimental results, preparing the manuscript.

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

05.10.2023

15.11.2023