

6. Vasilenko, I.F. Teoriia rezhushchikh apparatov zhatvennykh mashin / I.F. Vasilenko // Trudy VISKhOM. – Moskva: 1937. – No. 5. – S. 7–14.

7. Zheligovskii, V.A. Eksperimentalnaia teoriia rezaniia lezviem / V.A. Zheligovskii // Trudy MIMESKh. – Vyp. 9. – Moskva, 1940. – 27 s.

8. Ishlinskii A.Iu. Zadacha o skorosti kosby zlakov // Selkhoz mashina. – 1937. – No. 5. – S. 6-7.

9. Mekhaniko-tekhnologicheskie osnovy sovershenstvovaniia kosilok dlia meliorirovannykh zemel i lugopastbishchnykh ugodii / E.I. Mazhugin [i dr.]. – Gorki: BGSKhA, 2017. – 247 s.

10. Reczulski, M. (2020). Optimization of cutting speed and clearance angle in the disc chipper. Wood Research. DOI:10.37763/wr.1336-4561/65.6.951962.



УДК 631.363.21

DOI: 10.53083/1996-4277-2023-224-6-78-85

Р.В. Бесполденев, А.М. Левин, И.Я. Федоренко

R.V. Bepoldenov, A.M. Levin, I.Ya. Fedorenko

## ВИБРОАКТИВНОСТЬ МОЛОТКОВЫХ ЗЕРНОДРОБИЛОК С ОППОЗИТНОЙ ЗАГРУЗКОЙ ИСХОДНОГО МАТЕРИАЛА

### VIBRATION ACTIVITY OF HAMMER GRAIN CRUSHERS WITH OPPOSITE FEED MATERIAL LOADING

**Ключевые слова:** виброактивность, молотковая зернодробилка, оппозитная загрузка, парное соотношение подачи, регрессионный анализ модели.

Проведенными экспериментальными исследованиями подтверждены ранее полученные теоретические выводы о том, что виброактивность молотковых дробилок для кормового зерна может быть снижена при оппозитной загрузке измельчаемого материала через две зеркально расположенные загрузочные горловины. Было установлено, что парное взаимодействие факторов подачи сырья значительно снижает виброактивность. С увеличением подачи материала в камеру дробления с левой и правой части измельчителя параметр виброускорения на корпусе дробилки снижается до определенного уровня, когда соблюдается равенство загружаемого сырья в левое и правое отверстие. Исследование позволило выявить параметры минимального уровня вибраций для работы дробилки с оппозитной загрузкой. Виброактивность молотковых дробилок может быть снижена, в зависимости от измельчаемого материала, на 11,51-14,92% с помощью применения технологии оппозитной загрузки и равного соотношения двусторонней подачи при технологическом процессе переработки зерновых культур. При измельчении материала воздушный поток, а также материал, находящийся в камере измельчения, создают препятствие проникновению зерновых компонентов через загрузочную горловину, расположенную со стороны молотков, вращающихся вертикально вверх по восходящей ветви траектории, что приводит к несоответствию величины объема материала, поступающего на измельчение через 2 зеркально расположенные загрузочные горловины. С целью снижения виброак-

тивности молотковой дробилки авторами рекомендована молотковая дробилка для измельчения зерновых компонентов с оппозитной загрузкой исходного сырья с системой привода дозирующих шнеков, обеспечивающая возможность равномерной двухсторонней загрузки материала в камеру измельчения.

**Keywords:** vibration activity, hammer grain crusher, opposite loading, paired feed ratio, model regression analysis.

Experimental studies have confirmed the previously obtained theoretical conclusions that the vibration activity of hammer crushers for fodder grain may be reduced with the opposite loading of the crushed material through two mirror-positioned loading necks. It was found that the paired interaction of feed factors significantly reduced vibration activity. With increasing supply of material to the crushing chamber from the left and right sides of the shredder, the vibration acceleration parameter on the crusher body decreases to a certain level when the equality of the loaded raw materials in the left and right holes is observed. The study revealed the parameters of the minimum vibration level for the operation of the crusher with opposite loading. The vibration activity of hammer crushers may be reduced depending on the crushed material by 11.51-14.92% by using the technology of opposite loading and equal ratio of two-way feeding during the technological process of grain processing. When grinding the material, the air flow, as well as the material in the grinding chamber, create an obstacle to the penetration of grain components through the loading neck located on the side of the hammers rotating vertically upwards along the ascending branch of the trajectory; this leads to mismatching volume of the material

entering the grinding through two mirrored loading necks. In order to reduce the vibration activity of the hammer crusher, the authors proposed a hammer crusher for grinding grain components with an opposite material loading

with a metering screw drive system which provides the possibility of uniform two-way loading of the loaded material into the grinding chamber.

**Бесподенов Роман Викторович**, аспирант, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: Roman3792007@rambler.ru.

**Левин Алексей Михайлович**, к.т.н., докторант, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, р.п. Краснообск, Новосибирская обл., Российская Федерация, e-mail: Lev-alex@mail.ru.

**Федоренко Иван Ярославович**, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: IJFedorenko@mail.ru.

**Bespoldenov Roman Viktorovich**, post-graduate student, Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: roman3792007@rambler.ru.

**Levin Aleksey Mikhaylovich**, Cand. Tech. Sci., doctoral student, Siberian Federal Scientific Center of Agro-Biotechnologies of Rus. Acad. of Sci., Krasnoobsk, Novosibirsk Region, Russian Federation, e-mail: lev-alex@mail.ru.

**Fedorenko Ivan Yaroslavovich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: ijfedorenko@mail.ru.

### Введение

В технологической цепочке кормоприготовления дробление зернофуража является необходимым и одним из наиболее энергоемких процессов.

Основным оборудованием для подготовки зерновых культур к скармливанию являются молотковые дробилки ударного типа с горизонтальным расположением ротора [1, 2]. При этом к недостаткам данного оборудования относятся виброактивность и существенный расход энергии [3-6].

Шумность и виброактивность молотковых дробилок для зерна зависят от многих факторов, таких как мощность, скорость вращения ротора, конструкции корпуса и т.д.

Некоторые производители дробилок используют специальные технологии и материалы, чтобы снизить шумность и вибрации дробилок, например, использование низкошумных двигателей, установка звукопоглощающих материалов и демпферов.

В целях снижения уровня вибраций молотковых дробилок, которые они генерируют в процессе переработки сырья, нами предложена конструкция, с оппозитной загрузкой исходного сырья [7].

**Цель** исследования – оценка влияния двухсторонней загрузки измельчаемого материала в молотковую дробилку с оппозитной загрузкой на виброактивность в ходе процесса переработки зерновых культур и подтверждение ранее полу-

ченных результатов теоретических исследований о снижении вибрации за счет соосной загрузки молотков ротора.

### Материалы и методы исследования

Для изучения технологического процесса, протекающего в дробилке с оппозитной загрузкой, проверки теоретически полученных данных об уменьшении уровня механических колебаний, возбуждаемых молотками, был изготовлен экспериментальный образец дробилки с оппозитной загрузкой зерна.

Экспериментальная установка позволяет в необходимых пределах варьировать значениями факторов, влияющих на исследуемый процесс.

Частоту вращения ротора (угловую скорость вращения вала) изменяли преобразователем частоты KIPPRIBOR серии AFD – M055.43B 5.5 кВт.

Загрузку дробилки производили посредством изменения зазора проходного сечения правой и левой горловин при помощи вертикального перемещения регулировочных устройств – шибберных заслонок.

В процессе исследования измеряли и определяли следующие величины:

- продолжительность опыта;
- параметры вибрации (в качестве основной величины использовать показатель виброускорения).

Уровень вибрации измеряли виброметром Мегеон-09631.

Экспериментальные исследования проводили согласно комплексной методике, включающей известные и адаптированные методики по определению качественных и энергетических показателей процесса, обеспечивающих требуемую точность, достоверность, воспроизводимость и адекватность результатов [8].

В качестве критерия оптимальности было выбрано виброускорение на корпусе дробилки.

Факторами были определены следующие величины:

- угловая скорость вращения ротора  $\omega$ ,  $\text{мин.}^{-1}$ ;
- подача исходного материала в левое отверстие  $q_1, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ;
- подача исходного материала в правое отверстие  $q_2, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ .

Расчет кодированных значений факторов и границы их изменений занесены в таблицу.

Таблица

**Расчетные значения факторов, влияющих на виброактивность дробилки**

Наименование фактора, влияющего на определяемые параметры и единицы измерения	Условное обозначение		Уровни варьирования			Интервал варьирования $\lambda_i$
	натуральное	кодированное	нижний	основной	верхний	
			-1	0	+1	
Подача исходного материала в левое отверстие, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$q_1$	$X_1$	0,00	0,04	0,08	0,04
Подача исходного материала в правое отверстие, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$q_2$	$X_2$	0,00	0,04	0,08	0,04
Угловая скорость вращения ротора, $\text{рад/с}$	$\omega$	$X_3$	351,8	452,3	552,8	100,5

Для анализа составляющих параметров вибрации в качестве основной величины использовали параметры виброускорения  $a_B$ , ( $\text{м/с}^2$ ):

$$a_B = f_5(x_1, x_2, x_3).$$

При реализации многофакторного эксперимента решали задачу получения уравнений регрессии в кодированном виде, где в качестве функции отклика, характеризующего работу дробилки, принят  $Y$ -виброактивность механической системы посредством определения амплитуды виброускорения  $a_B$ .

С целью уменьшения количества опытов, учитывая, что в принятом факторном пространстве искомые функции отклика будут описываться полиномиальными уравнениями второго порядка, использовали план полного факторного эксперимента второго порядка Бокса-Бенкена типа ПФЭ  $3^3$ .

Этот план представляют собой определенные выборки строк из полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа  $3^k$  (где  $k=3$ ), где каждый фактор варьируется на трех уровнях: +1, 0, -1,

что является удобным при практическом применении, способствует упрощению и удешевлению эксперимента [9]. Так, при использовании плана Бокса-Бенкена количество опытов сокращается с 27 до 15.

Для проведения исследований в качестве зернового материала были взяты пшеница и ячмень.

После получения и первичной обработки информации в процессе опытов дальнейшую ее статистическую обработку осуществляли на стационарном компьютере при помощи специального инженерного математического программного обеспечения – программы «PTC Mathcad 15.0».

### Результаты исследования и их обсуждение

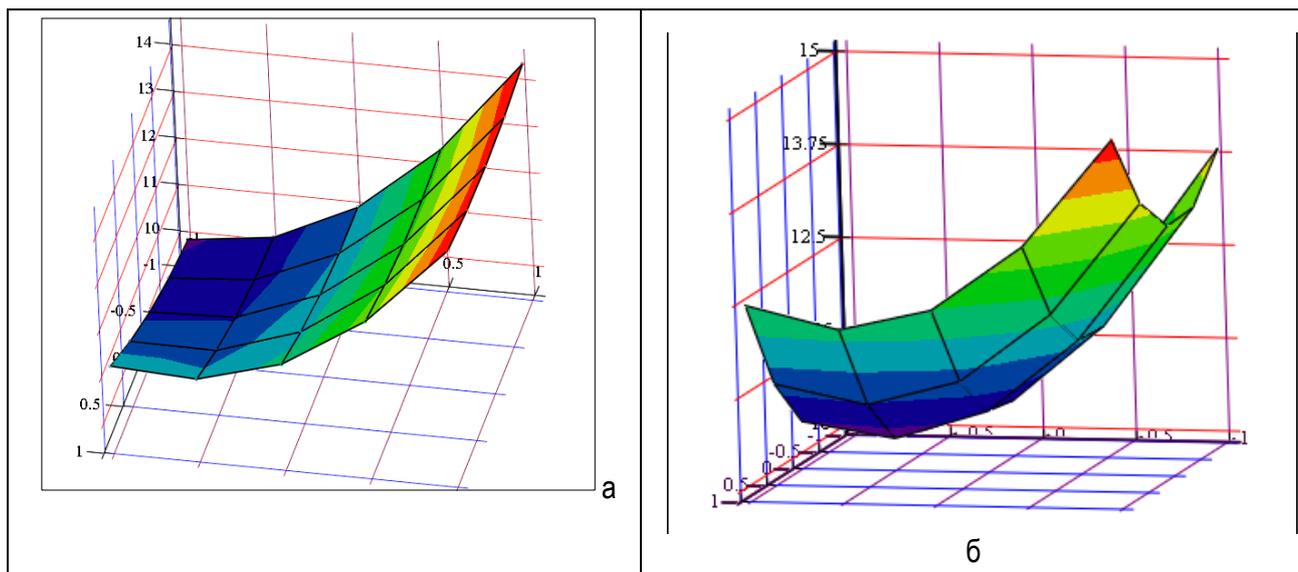
По результатам статистической обработки результатов эксперимента, где в качестве исходного материала взята пшеница, получено уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$Y(X_1, X_2, X_3) = 14.63 - 0.20 \times X_1 + 1.60 \times X_2 + 5.35 \times X_3 - 0.325 \times X_1 \times X_2 - 0.525 \times X_1 \times X_3 - 0.325 \times X_2 \times X_3 + 0.196 \times X_1^2 + 1.196 \times X_2^2 + 1.846 \times X_3^2. \quad (1)$$

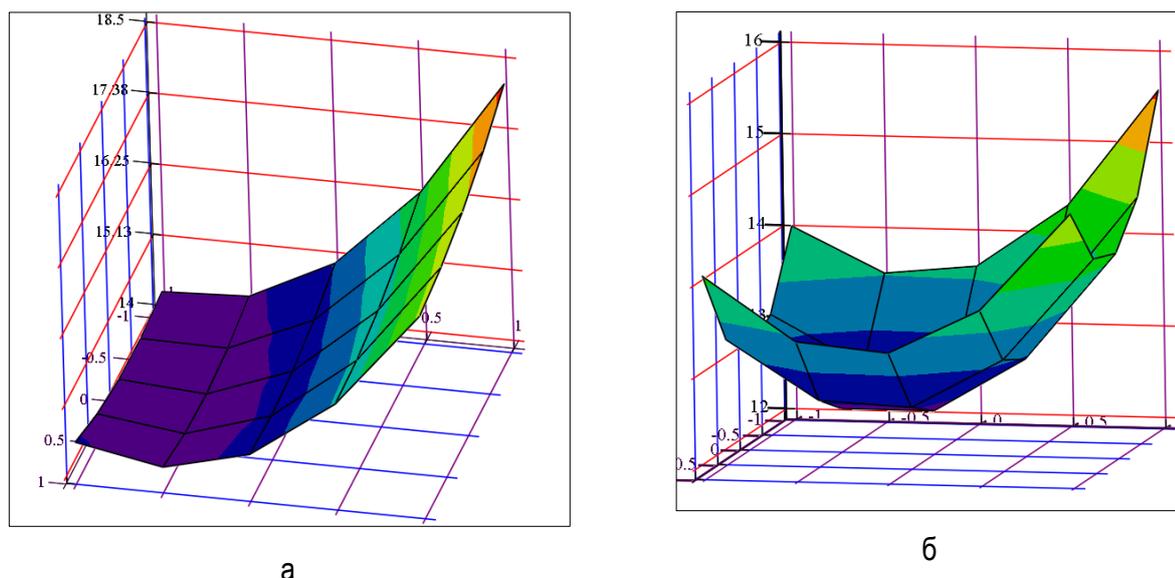
Регрессионный анализ этой модели при помощи программного обеспечения «PTC Mathcad 15.0» показывает, что коэффициент детерминации  $R^2$  составляет 97,8%, что свидетельствует о адекватности модели (1).

Нами визуализировано составленное уравнение регрессии (1), представляющее поверхность отклика в аксонометрии (рис. 1 а, 2 а, 3 а).

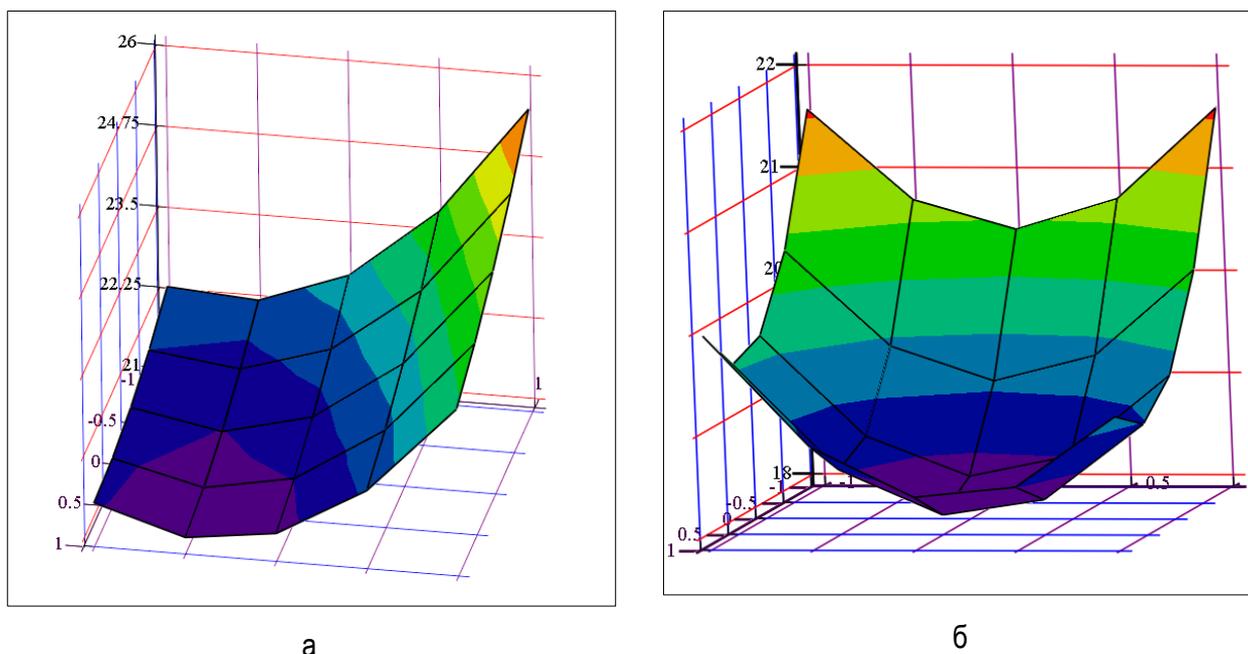
Увидеть одновременное влияние всех участвующих в эксперименте независимых переменных (факторов) на параметр оптимальности не представляется возможным, поэтому один из факторов устанавливался на постоянном уровне.



**Рис. 1. Поверхность отклика виброускорения  $Y$  в зависимости от сочетаний факторов подачи исходного материала в левое отверстие  $X_1$  и правое отверстие  $X_2$ , при значении третьего фактора уравнения  $X_3 = -1 = const$ :  
а – измельчение пшеницы; б – измельчение ячменя**



**Рис. 2. Поверхность отклика виброускорения  $Y$  в зависимости от сочетаний из трех факторов подачи исходного материала в левое отверстие  $X_1$  и правое отверстие  $X_2$ , при значении третьего фактора уравнения  $X_3 = 0 = const$ :  
а – измельчение пшеницы; б – измельчение ячменя**



**Рис. 3. Поверхность отклика виброускорения  $Y$  в зависимости от сочетаний из трех факторов подачи исходного материала в левое отверстие  $X_1$  и правое отверстие  $X_2$ , при значении третьего фактора уравнения  $X_3 = +1 = const$ :  
а – измельчение пшеницы; б – измельчение ячменя**

Анализируя результаты визуализированного уравнения регрессии, можно сделать следующие выводы:

1. В процессе измельчения пшеницы минимальное значение виброактивности достигается при увеличении подачи измельчаемого материала в левое отверстие по сравнению с правым, по соотношению 3/1, что приводит к снижению виброактивности. Это прослеживается на рисунках 1 а, 2 а, 3 а, на которых представлены поверхности отклика в декартовой прямоугольной системе координат. Видно, что поверхность имеет практически граничные минимумы в зоне изменения факторов в эксперименте.

2. С увеличением параметра  $X_2$ , характеризующего подачу исходного материала в правое отверстие, наблюдается возрастание величины выходного параметра виброускорения. При увеличении третьего фактора  $X_3$  наблюдается постепенная пологая структура параболоида от центра к периферии, что свидетельствует о результате совместного действия двух парных параметров  $X_1 X_2$ , которые могут оказывать

в меньшей степени влияние на виброускорение, в сравнении с сочетанием данных факторов при минимальном значении угловой скорости.

При измельчении пшеницы, исходя из проекций на координатную плоскость, представленных на графических изображениях, минимальные параметры вибрации при угловой скорости вращения ротора  $X_3 = -1$  составили от 9,5 до 14,5 м/с<sup>2</sup>;  $X_3 = 0$  – от 14 до 18,5 м/с<sup>2</sup>;  $X_3 = +1$  – от 21 до 26 м/с<sup>2</sup>.

При оптимизации процесса измельчения пшеницы по критерию минимума параметров виброускорения при помощи программы «РТС Mathcad 15.0» получили следующие значения:

- при угловой скорости вращения ротора  $X_3 = -1$ :

$$\text{Minimize } (Y, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} -1 \\ -0.941 \\ -1 \end{pmatrix};$$

- при угловой скорости вращения ротора  $X_3 = 0$ :

$$\text{Minimize } (Y, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} -0.05 \\ -0.676 \\ -1 \times 10^{-6} \end{pmatrix};$$

- при угловой скорости вращения ротора  $X_3 = 1$ :

$$\text{Minimize } (Y, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} 1 \\ -0.397 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Анализ оптимизации процесса измельчения пшеницы по критерию минимума величины виброускорения указывает на тот факт, что при увеличении параметра угловой скорости вращения ротора  $X_3$  наблюдается незначительное уменьшение соотношения загружаемого материала в левое отверстие по сравнению с правым, от 2,9 кг/сек. : 1 кг/сек. до 3,3 кг/сек. : 1 кг/сек. Указанное говорит о том, что минимальное значение виброускорения при измельчении пшеницы достигается при оппозитной загрузке дробилки.

В результате статистической обработки результатов эксперимента, где в качестве исходного материала для измельчения взят ячмень, а в качестве функции отклика также принято виброускорение, получено уравнение регрессии в кодированных переменных (2):

$$Y(X_1, X_2, X_3) = 12.367 - 0.15 \times X_1 + 0.588 \times X_2 + 3.813 \times X_3 - 0.2 \times X_1 \times X_2 - 0.85 \times X_1 \times X_3 - 0.775 \times X_2 \times X_3 + 1.104 \times X_1^2 + 1.179 \times X_2^2 + 2.129 \times X_3^2. \quad (2)$$

Результаты анализа уравнения полиномиальной регрессии (аппроксимирующие результаты), записанные в матрице  $Y$ , к данным, содержащимся в матрице  $X$ , показывает, что для данного уравнения коэффициент детерминации  $R^2 = 95.9\%$ . Это говорит об адекватном полученном уравнении.

Поверхности отклика по параметру виброускорения при измельчении ячменя представлены на рисунках 1 б, 2 б, 3 б.

Парные соотношения подачи исходного материала в левое  $X_1$  и правое отверстие  $X_2$  об-

разуют поверхность параболоида, приближающегося к фиксированному пределу нижней границы величины виброускорения, с центром оси симметрии по оси  $Z$ , с ярко выраженной структурой нижней части параболоида. Увеличение величины виброускорения наблюдается с повышением значений величины парных параметров  $X_2 X_3$ , и в меньшей степени  $X_1 X_3$ .

При измельчении ячменя, исходя из проекций на координатную плоскость, минимальные параметры вибрации при угловой скорости вращения ротора  $X_3 = -1$  составили от 10 до 15 м/с<sup>2</sup>; при  $X_3 = 0$  – от 12 до 15,5 м/с<sup>2</sup>; при  $X_3 = +1$  – от 18 до 22 м/с<sup>2</sup>.

При оптимизации процесса измельчения ячменя по критерию минимума параметров виброускорения получили следующие значения:

- при угловой скорости вращения ротора  $X_3 = -1$ :

$$\text{Minimize } (Y, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} -0.372 \\ -0.61 \\ -1 \end{pmatrix};$$

- при угловой скорости вращения ротора  $X_3 = 0$ :

$$\text{Minimize } (Y, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} -0.046 \\ -0.245 \\ -1 \times 10^{-6} \end{pmatrix};$$

- при угловой скорости вращения ротора  $X_3 = 1$ :

$$\text{Minimize } (Y, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} 0.464 \\ 0.119 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Анализ оптимизации процесса измельчения ячменя по критерию минимума величины виброускорения на корпусе дробилки указывает на тот факт, что минимальное значение виброускорения возможно в случае сочетания двух факторов двусторонней подачи материала.

Результаты эксперимента показали, что односторонняя загрузка материала в горловину камеры измельчения, расположенную со стороны вращающихся молотков, совершающих дви-

жение вертикально вниз по нисходящей траектории  $X_2$ , приводит к увеличению величины виброускорения. Воздушный поток, создаваемый вращающимися ударными элементами в камере измельчения, а также вращающийся воздушно-продуктовый слой создают препятствие проникновению материала внутрь камеры измельчения дробилки из горловины, расположенной со стороны вращающихся молотков, совершающих движение вертикально вверх по восходящей ветви траектории, что обуславливает в меньшей степени влияние фактора  $X_1$  на величину виброускорения.

При измельчении пшеницы и ячменя величина виброускорения снижается до нижней границы при условии парной подачи материала, с увеличением объема материала в горловину, расположенную со стороны вращающихся молотков, совершающих движение вертикально вверх по восходящей траектории, и уровень вибрации повышается при односторонней подаче.

### Выводы

1. Экспериментально подтверждено, что для дробилки горизонтального типа необходимы условия двусторонней оппозитной загрузки материала в камеру измельчения. Установлено, что оппозитная загрузка способствует снижению виброускорения корпуса дробилки на 11,51% при измельчении пшеницы и на 14,92% при измельчении ячменя.

2. Для получения еще большего снижения виброактивности молотковой дробилки с оппозитной загрузкой сырья необходима принудительная одинаковая подача исходного сырья в правое и левое загрузочные отверстия, например, при помощи дозирующих шнеков.

### Библиографический список

1. Экспериментально-теоретическое исследование работы молотковой дробилки / И. В. Коношин, Р. А. Булавинцев, А. В. Волжен-

цев, А. П. Башкирев. – Текст: непосредственный // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 9. – С. 198-204.

2. Рындин, А. Ю. Исследование надежности рабочих органов зернодробилки закрытого типа / А. Ю. Рындин, Д. Ю. Данилов. – Текст: непосредственный // Карельский научный журнал. – 2015. – № 1 (10). – С. 190-192.

3. Анализ вредных факторов при работе с молотковой дробилкой / А. А. Жумагалиев, К. В. Голиков, Д. Б. Болотов [и др.]. – Текст: непосредственный // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – 2020. – С. 142-146.

4. Казаров, А. Р. Влияние измельчаемого продукта на шумовибрационные характеристики дробилкой молотковой МДУ-1 / А. Р. Казаров, А. Е. Яблоков. – Текст: непосредственный // Тенденции формирования науки нового времени: сборник статей Международной научно-практической конференции. – 2015. – С. 27-28.

5. Федоренко, И. Я. Причины виброактивности молотковых зернодробилок с горизонтальным расположением барабана / И. Я. Федоренко, Р. В. Бесполденев. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 2. – С. 96-104. – EDN: OWVLKB.

6. Оценка степени воздействия измельчающих и смешивающих машин на окружающую среду / Д. В. Фролов, А. А. Гладышев, Б. Г. Рогачев, Л. Н. Павлов. – Текст: непосредственный // Вестник мясного скотоводства. – 2010. – Т. 2, № 63. – С. 148-152.

7. Патент РФ № 2 746 586 С1, МПК В02С 13/04(2006.01). Молотковая дробилка / Федоренко И. Я., Бесполденев Р. В. – Оубл.

16.04.2021 г. Бюл. № 11. – 5 с. – EDN: FSBBVQ.  
– Текст: непосредственный.

8. Федоренко, И. Я. Методологические аспекты экспериментальной оптимизации процесса измельчения кормового зерна / И. Я. Федоренко. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 5 (199). – С. 101-107. – EDN: XCTRAV.

9. Анисимов, П. Н. Об использовании методики планирования эксперимента в соответствии с трехуровневыми планами Бокса-Бенкена / П. Н. Анисимов. – Текст: непосредственный // Вестник магистратуры. – 2017. – № 2-2 (65). – С. 29-31.

### References

1. Konoshin, I.V. Eksperimentalno-teoreticheskoe issledovanie raboty molotkovoi drobilki / Konoshin I.V., Bulavintsev R.A., Volzhentsev A.V., Bashkirev A.P. // Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii. – 2018. – No. 9. – S. 198-204.

2. Ryndin, A.Iu. Issledovanie nadezhnosti rabochikh organov zernodrobilki zakrytogo tipa / Ryndin A.Iu., Danilov D.Iu. // Karelskii nauchnyi zhurnal. – 2015. – No. 1 (10). – S. 190-192.

3. Zhumagaliev, A.A. Analiz vrednykh faktorov pri rabote s molotkovoi drobilkoj / Zhumagaliev A.A., Golikov K.V., Bolotov D.B., Kirmasov V.Iu., Kornev A.S. // Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlia APK. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov. – 2020. – S. 142-146.

4. Kazarov A.R. Vliianie izmelchaemogo produkta na shumovibratsionnye kharakteristiki drobilkoj molotkovoi MDU-1 / Kazarov A.R.,

lablokov A.E. // Tendentsii formirovaniia nauki novogo vremeni. Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. – 2015. – S. 27-28.

5. Fedorenko, I.Ia. Prichiny vibroaktivnosti molotkovykh zernodrobilok s gorizontalnym raspolozheniem barabana / I.Ia. Fedorenko, R.V. Bepoldenov // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2021. – No. 2. – S. 96-104. – EDN: OWVLKB

6. Frolov, D.V. Otsenka stepeni vozdeistviia izmelchaiushchikh i smeshivaiushchikh mashin na okruzhaiushchuiu srediu // Frolov D.V., Gladyshev A.A., Rogachev B.G., Pavlov L.N. // Vestnik miasnogo skotovodstva. – 2010. – T. 2. – No. 63. – S. 148-152.

7. Patent RF No. 2 746 586 C1, MPK B02C 13/04(2006.01). Molotkovaia drobilka / I.Ia. Fedorenko, R.V. Bepoldenov. – Opubl. 16.04.2021 g. Biul. No. 11. – 5 s. – EDN: FSBBVQ.

8. Fedorenko, I.Ia. Metodologicheskie aspekty eksperimentalnoi optimizatsii protsessa izmelcheniia kormovogo zerna / Fedorenko I.Ia. // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2021. – No. 5 (199). – S. 101-107. – EDN: XCTRAV.

9. Anisimov, P.N. Ob ispolzovanii metodiki planirovaniia eksperimenta v sootvetstvie s trekhurovnevymi planami Boksa-Benkена / P.N. Anisimov // Vestnik magistratury. – 2017. – No. 2-2 (65). – S. 29-31.

*Исследование проведено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям по программе «Студенческий старт» в рамках Федерального проекта «Платформа университетского технологического предпринимательства» (грант № 462ГССС15-Л/78541).*

