

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И КИНЕМАТИКА ПЛОСКОГО РЕШЕТА, СОВЕРШАЮЩЕГО ПОПЕРЕЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

PHYSICAL MODEL AND KINEMATICS OF A FLAT SIEVE MAKING TRANSVERSE OSCILLATIONS

Ключевые слова: плоское решето, поперечные колебания, физическая модель, кинематика, дифференциальное уравнение.

Известно, что машины вибрационного действия получили большое распространение для интенсификации различных технологических процессов и оцениваются как технологии будущего. Вибрационное воздействие призвано обеспечить такое динамическое состояние обрабатываемой среды, которое способствует интенсификации и качественному протеканию технологического процесса при одновременном снижении энергосиловых параметров. Показаны актуальность и краткий анализ зерноочистительной техники для интенсификации процесса сепарации зернового материала. Применительно к решетной зерноочистительной машине технологический процесс сепарации зерновой смеси на решете представлен в виде блок-схемы, которая характеризуется установлением закономерностей между входными и выходными параметрами. Так, для плоского решета зерноочистительной машины, совершающего поперечные колебания, рассмотрены физическая модель и кинематика решета, которые наглядно представлены в виде рисунков. Приведены основные допущения, принятые для теоретического определения параметров, характеризующих процесс движения сепарируемого материала по плоскому решету, совершающему поперечные колебания. Рассмотрено, что на плоское решето с массой m действуют такие силы, как упругая сила пружины $F_{\text{сп}}$ и возмущающая сила $F_{(t)}$. Подробно изложены действующие силы и составлено дифференциальное уравнение движения такого плоского решета. Получена зависимость, определяющая смещение плоского решета в направлении оси x . После 2-кратного дифференцирования зависимости и принятых обозначений окончательно получены формулы для определения скорости и ускорения колебания плоского решета, совершающего поперечные колебания. Опре-

делено, что поперечное колебание плоского решета складывается из свободных и вынужденных колебаний.

Keywords: flat sieve, transverse oscillations, physical model, kinematics, differential equation.

It is known that vibration machines have become widespread for the intensification of various technological processes and are considered to be the technologies of the future. The vibration effect is intended to provide such a dynamic state of the processed medium which contributes to the intensification and high-quality flow of the technological process while simultaneously reducing energy and power parameters. This study concerns the relevance and brief analysis of grain cleaning equipment for intensifying the process of separation of grain material. In relation to a sieve grain cleaning machine, the technological process of separating the grain mixture on a sieve is presented in the form of a block diagram which is characterized by establishing patterns between input and output parameters. Thus, for a flat sieve of a grain cleaning machine that performs transverse vibrations, the physical model and kinematics of the sieve are considered which are clearly presented in the form of drawings. The main assumptions adopted for the theoretical determination of the parameters characterizing the process of movement of the separated material along a flat sieve performing transverse vibrations are presented. It is considered that a flat sieve with mass m is acted upon by such forces as the elastic force of the spring F_{sp} and the disturbing force $F_{(t)}$. The acting forces are described in detail and the differential equation of motion of such a flat sieve is drawn up. The dependence was obtained that determined the displacement of a flat sieve in the direction of the x axis. After twofold differentiation of the dependence and the adopted notation, the equations for determining the speed and acceleration of oscillation of a flat sieve performing transverse oscillations were finally obtained. It has been determined that the transverse vibration of a flat sieve consists of free and forced vibrations.

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

Камышов Юрий Николаевич, к.т.н., доцент, Барнаульский юридический институт МВД России, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: kamishovun@mail.ru.

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

Kamyshev Yuriy Nikolaevich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Barnaul Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Barnaul, Russian Federation, e-mail: kamishovun@mail.ru.

Введение

Известно, что все зерно после комбайновой уборки подвергается послеуборочной обработке путем очистки, сортирования и сушки. В настоящее время ведутся исследования по разработке и созданию инновационных способов очистки зерна, современных и новых перспективных рабочих органов машин для обработки зерна.

Отмечено, что «машин и технологии, использующие вибрацию, признаны прогрессивными, позволяют существенно достигнуть результатов работы, в том числе и по качественным показателям» [1, 2].

Известно, что подобные машины и технологии нашли применение во многих отраслях производства для интенсификации различных технологических процессов [3-5]. Не является исключением и процесс решетчатого сепарирования зерновых смесей. В ряде работ описаны наиболее распространенные способы и методы совершенствования машин для послеуборочной обработки зерна «путем использования решет с продолговатыми отверстиями, расположенными под оптимальным углом к направлению его движения, усложнения закона колебаний плоских решет по различной траектории» [6-14].

Различают вибрационные воздействия, которые вызваны либо продольными, либо поперечными колебаниями плоского решета, или их совместное взаимодействие одновременно и другие. На сегодняшний день к наиболее изученным относится вариант продольных колебаний, которые присущи работе основных выпускаемых отечественных и некоторых зарубежных зерноочистительных машин.

Обзор и анализ литературных источников показывают, что в этом направлении нет кардинальных, прорывных изменений в лучшую сторону [15]. Как с теоретической, так и с экспериментальной точки зрения изучение движения слоя сыпучей среды по вибрирующей решетчатой поверхности, представляет научный интерес.

В работе [16] предпринята попытка рассмотреть «модель технологического процесса сепарирования зерна». Рекомендовано отсепарированную зерновую массу, зависящую от многих факторов, исследовать вероятностными методами.

Объекты и результаты исследований

В данной работе в качестве научных изысканий нами предлагается возможность рассмотре-

ния физической сущности «процесса сепарирования и кинематики движения плоского решета, совершающего поперечные колебания».

Физическую сущность процесса сепарирования можно уяснить из рассмотрения модели, представленной на рисунке 1.

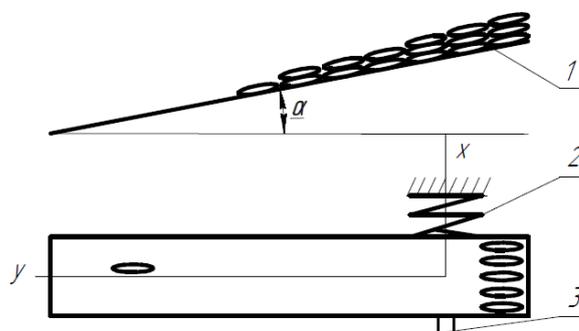


Рис. 1. Физическая модель процесса сепарирования:

1 – решето; 2 – пружина; 3 – привод решета

В общем случае плоское решето наклонено под углом α к оси y и совершает под действием привода 3 и пружины 2 колебательное движение в направлении оси x . В зависимости от конструкции решета привод создает различную возмущающую силу, зависящую от времени E и оказывающую воздействие на решето и сепарируемый материал. При этом колебания решета могут быть как гармоническими, зависящими от смещения x , так и сложными, состоящими из отдельных колебаний (гармоник).

На плоском решете находится сепарируемая масса зерна, направленная в относительном движении по отношению к решету. При этом зерно совершает переносное движение вместе с решетом и движется относительно решета.

Для теоретического определения параметров, характеризующих процесс движения сепарируемого материала по плоскому решету, примем следующие допущения:

1. Сепарируемая масса расположена относительно поверхности решета в n слоев.
2. Сход отсепарируемых частиц осуществляется только из слоя, непосредственно примыкающего к поверхности решета.
3. Сила сопротивления воздуха не учитывается.
4. Сила трения частиц в различных слоях пропорциональна нормальному давлению.
5. Коэффициент трения на поверхностях слоя принимаем постоянным.

6. Коэффициент трения между слоями равен коэффициенту трения частиц нижнего слоя о решето.

7. Силы взаимодействия частиц друг с другом не учитываются.

8. Плоское решето имеет идеальную геометрическую форму

9. Все точки решета имеют в данный момент времени одинаковую скорость и ускорение

10. Деформацией плоского решета под воздействием сепарируемого материала пренебрегаем.

Представим и изобразим на рисунке 2 колебания плоского решета в направлении оси x , соответствующей рисунку 1. Ось x направлена в поперечном направлении плоского решета, а ось y – в продольном направлении. В направлении оси y решето не перемещается, поэтому его скорость и ускорение в данном направлении равны нулю.

В направлении оси x плоское решето совершает колебательное движение. Из представленного рисунка 2 следует, что на плоское решето с массой m действуют две силы: упругая сила пружины $F_{\text{пр}}$ и возмущающая сила $F(t)$.

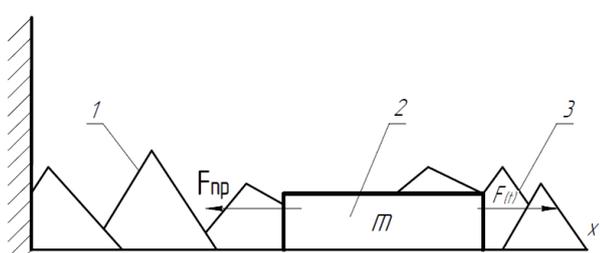


Рис. 2. К определению поперечных колебаний плоского решета:

1 – пружина; 2 – масса сепарируемого материала и решета; 3 – возмущающая сила

Дифференциальное уравнение движения плоского решета в данном случае будет иметь вид:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + F_{\text{пр}} = F(t). \quad (1)$$

Известно, что сила пружины пропорциональна ее деформации, т.е. $F_{\text{пр}} = cx$, где c – жесткость пружины. Возмущающая сила $F(t)$ зависит от конструкции привода и может иметь сложный колебательный характер. При приводе решета через кривошипный механизм, как это имеет место в большинстве зерноочистительных машин, возмущающая сила может быть определена по формуле

$$F(t) = mfR\omega^2(\cos\omega t + \lambda \cos 2\omega t), \quad (2)$$

где R – радиус кривошипа, м;

ω – частота вращения кривошипа, s^{-1} ;

f – коэффициент трения;

λ – геометрический параметр привода (отношение радиуса кривошипа к длине шатуна).

Учитывая, что радиус кривошипа R составляет величину порядка 0,1 от длины кривошипа, вторым составляющим в формуле (2) можно пренебречь, и дифференциальное уравнение (1) после подстановки в него значений сил примет следующий вид:

$$m\ddot{x} = m f R \omega^2 \cos \omega t. \quad (3)$$

Данное уравнение интегрируем при условии,

что при $t=0$, $x=0$, а скорость $\frac{dx}{dt} = 0$.

Для интегрирования уравнения (3) преобразуем его путем деления правой и левой частей на m к следующему виду:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + k^2 x = f R \omega^2 \cos \omega t, \quad (4)$$

где $k^2 = \frac{c}{m}$.

В результате интегрирования уравнения (4) получим следующую зависимость, определяющую смещение решета в направлении оси x :

$$x = -\frac{k R \omega^2}{k^2 + \omega^2} \cos \omega t + f \frac{R \omega^2}{k^2 + \omega^2} \cos \omega t. \quad (5)$$

После 2-кратного дифференцирования уравнения (5) получаем зависимости для определения скорости и ускорения колебания плоского решета:

$$\frac{dx}{dt} = \sin \omega t - \sin \omega t; \quad (6)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \cos \omega t - f \cos \omega t. \quad (7)$$

Обозначим входящие в уравнения (6) и (7) величины следующим образом:

$$A = \frac{k R \omega^2}{k^2 + \omega^2}; \quad B = f \frac{R \omega^2}{k^2 + \omega^2};$$

$$C = \frac{k^2 R \omega^2}{k^2 + \omega^2}; \quad D = f \frac{R \omega^4}{k^2 + \omega^2}.$$

В результате уравнения (6) и (7) примут окончательный вид:

$$\frac{dx}{dt} = A \sin \omega t - B \sin \omega t; \quad (8)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = C \cos \omega t - D \cos \omega t. \quad (9)$$

В уравнениях (8) и (9) частота собственных колебаний определяется по формуле $k = \sqrt{\frac{c}{m}}$, а период собственных колебаний $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{c}}$.

Таким образом, колебание плоского решета в направлении оси x складывается из двух коле-

баний. Первое колебание описывается первым слагаемым в правой части уравнения (5) и определяет свободные колебания плоского решета. Второе слагаемое правой части уравнения описывает вынужденные колебания плоского решета.

Выводы

1. Сущность технологического процесса сепарирования зерна в общем случае рассмотрена как физическая модель с принятыми допущениями.

2. Представлена кинематика плоского решета зерноочистительной машины, и составлено дифференциальное уравнение, позволяющее описывать колебания плоского решета, совершающего поперечные колебания.

Библиографический список

1. Федоренко, И. Я. Вибрационные процессы и устройства в АПК: монография / И. Я. Федоренко. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2016. – 289 с. – Текст: непосредственный.
2. Гудушаури, Э. Г. Теория вибрационных технологических процессов при некулоновом трении / Э. Г. Гудушаури, Г. Я. Пановко. – Москва: Наука, 1988. – Текст: непосредственный.
3. 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: 10.1088/1757-899X/221/1/012020.
4. Сабиев, У. К. Интенсификация технологических процессов приготовления комбикормов в условиях сельскохозяйственных предприятий: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Сабиев Уахит Калижанович; ФГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет». – Барнаул, 2012. – 319 с. – Текст: непосредственный.
5. Анализ работы плоского решета, совершающего колебания в горизонтальной плоскости / А. Ю. Головин, У. К. Сабиев, П. В. Чупин [и др.]. – Текст: непосредственный // Тракторы и сельхозмашины. – 2020. – № 4. – С. 27-34.
6. Пути совершенствования решет зерноочистительных машин / У. К. Сабиев, А. Ю. Головин, С. Е., Шакарова, С. Г. Ахметов. – Текст: непосредственный // Инновационные технологии в АПК как фактор развития науки в современных условиях: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Омск, 29 ноября 2019 года. – 2019. – С. 358-360.
7. Головин, А. Ю. Траектория движения зерновки по решету, совершающего круговые движения / А. Ю. Головин, У. К. Сабиев, А. С. Союнов. – Текст: непосредственный // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2017. – № 4. – С. 204-210.
8. Sabiev, U., Demchuk, E., Golovin, A., Skysanov, I. (2018). Experimental registrations of plain sieve operation, making transverse fluctuations. *Journal of Physics: Conference Series*. 1050. 012074. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012074.
9. Зильбернагель, А. В. Теоретическое исследование влияния траектории движения частицы на вероятность взаимодействия её с кромками продолговатого отверстия решета / А. В. Зильбернагель, У. К. Сабиев. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 9 (83). – С. 78-81.
10. Сабиев, У. К. Решетный стан зерноочистительной машины / У. К. Сабиев, А. Ю. Головин. – Текст: непосредственный // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 4. – С. 46.
11. Sabiev, U.K., et al. (2019). Probabilistic Approach to the Separation of Grain Material. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 582 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/582/1/012039.
12. Сабиев, У. К. Результаты экспериментальных исследований факторов, влияющих на работу плоского решета, совершающего поперечные колебания / У. К. Сабиев, А. Ю. Головин, И. В. Скусанов. – Текст: непосредственный // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития: материалы Национальной научно-практической конференции, Омск, 06 апреля 2017 года. – Омск, 2017. – С. 112-117.
13. Экспериментальные показатели работы плоского решета, совершающего поперечные колебания / У. К. Сабиев, Е. В. Демчук, А. Ю. Головин, И. В. Скусанов. – Текст: непосредственный // Проблемы машиноведения: материалы II Международной научно-технической конференции, Омск, 27-28 февраля 2018 года / [науч. ред. П. Д. Балакин]; Минобрнауки России, ОмГТУ [и др.]. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2018. – С. 108-113.
14. Сабиев, У. К. Сепарация зерна на плоском решете, совершающем поперечные колеба-

ния / У. К. Сабиев, И. В. Скусанов. – Текст: непосредственный // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2019. – № 1. – С. 141-147.

15. Sabiev, U., Golovin, A., Soyunov, A., Demchuk, E. (2022). Theoretical determination of the probability of a particle passing through an oblong opening of a sieve of grain cleaning machines for cleaning agricultural crops. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 954. 012066. DOI: 10.1088/1755-1315/954/1/012066.

16. Сабиев, У. К. Сепарирование зерна, движущегося по плоскому решету, совершающему поперечные колебания / У. К. Сабиев, А. Н. Яцунов, И. В. Скусанов – Текст: непосредственный // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2022. – № 3 (47). – С. 97-101.

References

1. Fedorenko I.Ia. Vibratsionnye protsessy i ustroistvav APK: monografiia. – Barnaul: RIO Altaiskogo GAU, 2016. – 289 s.

2. Gudushauri E.G., Panovko G.Ia. Teoriia vibratsionnykh tekhnologicheskikh protsessov pri nekulonovom trenii. – Moskva: Nauka, 1988.

3. 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: 10.1088/1757-899X/221/1/012020.

4. Sabiev U.K. Intensifikatsiia tekhnologicheskikh protsessov prigotovleniia kombikormov v usloviakh selskokhoziaistvennykh predpriatii: disertatsiia na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / GOU VPO "Altaiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet". – Barnaul, 2012. – S. 319.

5. Golovin A.Iu., Sabiev U.K., Chupin P.V., Soiunov A.S., Prokopov S.P. Analiz raboty ploskogo resheta, sovershaiushchego kolebaniia v gorizontalnoi ploskosti // *Traktory i selkhoz mashiny*. 2020. No. 4. S. 27-34.

6. Puti sovershenstvovaniia reshet zernoochistitelykh mashin / U.K. Sabiev, A.Iu. Golovin, S.E. Shakarova, S.G. Akhmetov // *Innovatsionnye tekhnologii v APK, kak faktor razvitiia nauki v sovremennykh usloviakh*. Sbornik Vserossiiskoi (natsionalnoi) nauchno-prakticheskoi konferentsii. 2019. S. 358-360.

7. Golovin A.Iu., Sabiev U.K., Soiunov A.S. Traektoriia dvizheniia zernovki po reshetu, sovershaiushchego krugovye dvizheniia // *Vestnik*

Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2017. – No. 4. – S. 204-210.

8. Sabiev, U., Demchuk, E., Golovin, A., Skusanov, I. (2018). Experimental registrations of plain sieve operation, making transverse fluctuations. *Journal of Physics: Conference Series*. 1050. 012074. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012074.

9. Zilbernegel A.V., Sabiev U.K. Teoreticheskoe issledovanie vlianiia traektorii dvizheniia chastitsy na veroiatnost vzaimodeistviia ee s kromkami prodolgovatogo otverstiia resheta // *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. – 2011. – No. 9 (83). – S. 78-81.

10. Sabiev U.K., Golovin A.Iu. Reshetnyi stan zernoochistitelnoi mashiny // *Traktory i selkhoz mashiny*. – 2013. – No. 4. – S. 46.

11. Sabiev, U.K., et al. (2019). Probabilistic Approach to the Separation of Grain Material. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 582 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/582/1/012039.

12. Sabiev U.K. Rezultaty eksperimentalnykh issledovaniy faktorov, vliiaushchikh na rabotu ploskogo resheta, sovershaiushchego poperechnye kolebaniia / U.K. Sabiev, A.Iu. Golovin, I.V. Skusanov // *Nauchnoe i tekhnicheskoe obespechenie APK, sostoianie i perspektivy razvitiia: sbornik materialov nauch.-prak. konf.* – Omsk, 2017. – S. 112-117.

13. Sabiev U.K. Eksperimentalnye pokazateli raboty ploskogo resheta, sovershaiushchego poperechnye kolebaniia / U.K. Sabiev, E.V. Demchuk, A.Iu. Golovin, I.V. Skusanov // *Problemy mashinovedeniia: materialy II Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Omsk, 27-28 fevralia 2018 g.)*. – Omsk: Izd-vo OmGTU, 2018. – S. 108-113.

14. Sabiev U.K., Skusanov I.V. Separatsiia zerna na ploskom reshete, sovershaiushchem poperechnye kolebaniia // *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. – 2019. – No.1. – S. 141-147.

15. Sabiev, U., Golovin, A., Soyunov, A., Demchuk, E. (2022). Theoretical determination of the probability of a particle passing through an oblong opening of a sieve of grain cleaning machines for cleaning agricultural crops. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 954. 012066. DOI: 10.1088/1755-1315/954/1/012066.

16. Sabiev U.K., Iatsunov A.N., Skusanov I.V. Separirovanie zerna, dvizhushchegosia po ploskomu reshetu, sovershaiushchemu poperechnye kolebaniia // *Vestnik Omskogo GAU*. 2022. No. 3 (47). S. 97-101.