

Исследование рабочего процесса сепаратора зерна с цилиндрическими решетками

Research of operational process of a grain separator with cylindrical screens

**Н. В. ЖОЛОбОВ, канд. техн. наук
А. В. ЯКИМОВ, инж.**

Вятская государственная сельскохозяйственная академия, Киров, Россия, zholobovnv@gmail.com

**N. V. ZHOLOBOV, PhD in Engineering
A. V. YAKIMOV, Engineer**

Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, Russia, zholobovnv@gmail.com

Решетные сепараторы находят широкое применение в зерноочистительных машинах. Сепарация происходит в процессе перемещения материала по поверхности решета. Относительное перемещение материала обеспечивается различными устройствами, сообщающими решету тот или иной характер движения. Наибольшее распространение получил качающийся решетный стан (грохот), в котором сдвиги зерна по решету происходят за счет инерции. Грохот имеет высокую производительность, однако знакопеременные динамические нагрузки вызывают усталость металла и снижают надежность машин. Сепараторы зерна с цилиндрическими решетками работают без динамических нагрузок и имеют простую конструкцию. Они менее чувствительны к влажности и засоренности очищаемого материала. Однако в процессе сепарации используется лишь 1/4—1/6 часть поверхности цилиндрического решета. Это снижает пропускную способность и ограничивает применение цилиндрических решет. Долю площади поверхности решета, используемую в процессе сепарации, можно увеличить за счет одновременного использования двух цилиндрических решет, которые расположены одно в другом и вращаются в противоположные стороны. Зерновой материал подается на внутреннюю поверхность внутреннего решета и образует подвижный слой, перемещающийся в осевом направлении. В процессе перемещения зерно проходит через отверстия, а крупные примеси сходят с решета. Зерно, прошедшее через отверстия внутреннего решета, благодаря вращению решета в разных направлениях попадает на ту часть наружного решета, которая свободна от образовавшегося подвижного зернового слоя. Определены рациональные режимы совместной работы решет, при которых процесс сепарации на наружном решете начинается сразу после касания зернового материала, прошедшего через отверстия внутреннего решета. Благодаря этому сепарирующая площадь решет увеличивается на 34—57 %.

Ключевые слова: сепаратор; очистка зерна; цилиндрическое решето; вращение решета; площадь сепарации; траектории зерновок; условие прохода.

Screen separators are widely used in grain-cleaning machines. The separation occurs in the process of movement of grain over the surface of screen. The relative movement of grain is provided by different devices with various modes of motion. The most common is a vibrating sieve pan (screener), in which the grain is moved over screen by inertia. Screener has a high efficiency, but the alternating dynamic loads cause the metal fatigue and reduce machine reliability. The grain-cleaning separators with cylindrical screens operate without dynamic loads and have a simple design. They are less sensitive to grain moisture and impurity. But the separation process uses only 1/4—1/6 of the cylindrical screen surface. This problem reduces the throughput and limits the scope of application of cylindrical screens. The proportion of useful surface area can be increased by simultaneous use of two cylindrical screens. They are located one inside the other and rotate in opposite directions. The grain enters on the inner surface of the inner screen and forms a movable layer that moves in the axial direction. During the movement process, the grain passes through perforations, while the large impurities fall down from the screen. The grain having passed through the perforations

of the inner screen reaches the section of the outer screen that is clear of movable grain layer. The rational conditions of simultaneous operation of screens are determined, under them the separation process on the outer screen starts immediately after the grain had passed through the perforations of the inner screen. Due to that the separation area is increased by 34–57 %.

Keywords: separator; grain cleaning; cylindrical screen; screen rotation; separation area; seed trajectory; condition of passing through.

Введение

Решетные сепараторы выполняют разделение зерновых смесей по размерам (прежде всего по толщине и ширине) и находят широкое применение в зерноочистительных машинах [1, 2]. Сепарация происходит при перемещении материала по поверхности решета [3, 4]. Относительное перемещение материала обеспечивается различными устройствами, сообщаящими решету тот или иной характер движения [5, 6].

Наибольшее распространение получил качающийся решетный стан (грохот), где сдвиги зерна по решету происходят за счет сил инерции [3, 7]. Грохот имеет довольно высокую производительность за счет использования всей поверхности решета, однако знакопеременные динамические нагрузки, вызывающие усталость металла, снижают надежность машин [8, 9].

Преимущества сепараторов зерна с цилиндрическими решетками заключаются в простоте конструкции, отсутствии динамических нагрузок и, как следствие, более высокой надежности [10, 11]. Кроме того, они менее чувствительны к влажности и засоренности очищаемого материала [12].

Ограниченность применения цилиндрических решет связана с низкой пропускной способностью, вызванной использованием в процессе сепарации лишь 1/4–1/6 части поверхности решета. Попытки поднять производительность цилиндрических решет путем увеличения частоты их вращения или повышения удельной подачи зернового материала приводят к образованию кольцевого слоя и нарушению работы [10].

Цель исследования

Цель данной работы — повышение пропускной способности сепаратора зерна с цилиндрическими решетками.

Материалы и методы

Долю площади поверхности решета, используемую в процессе сепарации, можно увеличить за счет одновре-

менного использования двух цилиндрических решет, которые расположены одно в другом и вращаются в противоположные стороны с разными угловыми скоростями [13].

Очищаемый материал, подаваемый на рабочую поверхность вращающегося внутреннего решета 1 (рис. 1, а), образует подвижный слой 4. Слой перемещается в осевом направлении за счет наклона цилиндра. На площади пятна контакта слоя очищаемого материала с решетом зерно проходит через отверстия, а крупные примеси сходят с решета. Благодаря вращению решет в противоположные стороны зерно, прошедшее через отверстия внутреннего решета, поступает на поверхность наружного решета 2, свободную от сформировавшегося на нем слоя очищаемого материала 3.

В результате на наружном решете сепарация протекает как в зоне контакта поступающего на него зерна, так и в месте расположения слоя очищаемого материала, что позволяет увеличить используемую площадь решет. Через отверстия наружного решета проходят мелкие примеси, а очищенное зерно сходит с решета.

Уменьшение габаритов сепаратора и обеспечение свободного перемещения зернового слоя по рабочей поверхности наружного решета достигаются смещением осей цилиндров решет относительно друг друга по осям x и y на величины S_x и S_y . Индивидуальная настройка внутреннего и наружного решет на оптимальные частоты вращения позволяет согласовать их совместную работу и повысить производительность.

Для определения оптимальных параметров и режимов функционирования сепаратора необходимо исследовать процесс совместной работы двух цилиндрических решет, расположенных одно в другом со смещением осей и вращающихся в разные стороны.

Исследования математических моделей технологического процесса сепарации зерна двумя цилиндрическими решетками, расположенными одно в другом со смещением осей, проводились с использованием программного обеспечения Microsoft Excel и Mathcad. Экс-

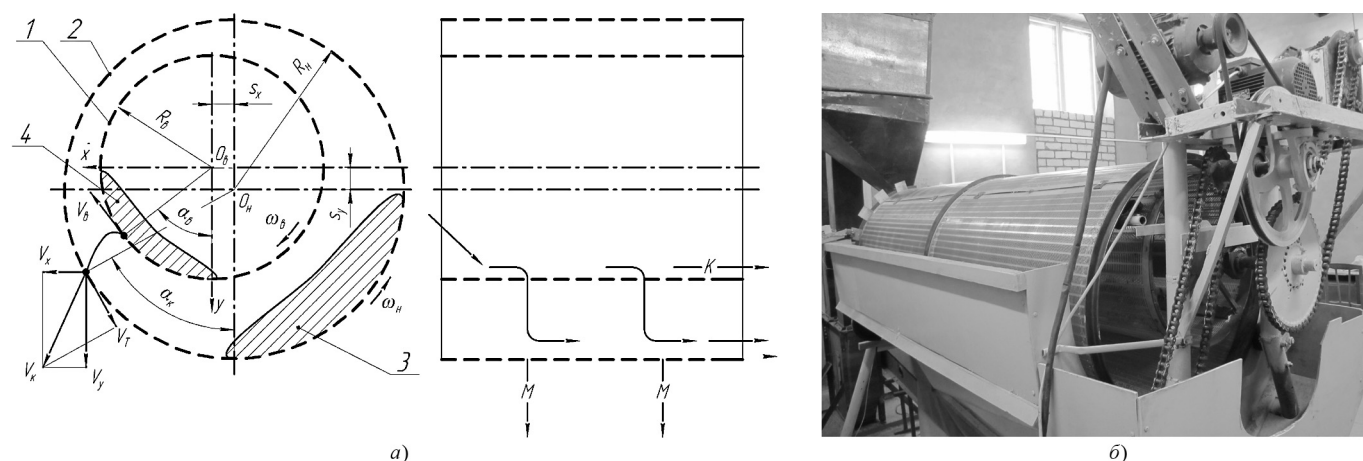


Рис. 1. Схема (а) и внешний вид (б) сепаратора зерна с двумя цилиндрическими решетками

периментальные исследования выполнялись на сепараторе зерна, показанном на рис. 1, б.

Параметры цилиндров определялись исходя из размеров стандартных решет. Во внутреннем цилиндре установлено четыре решета размером 790×990 мм, в наружном — шесть решет. Диаметр внутреннего цилиндрического решета составлял $D_B = 505$ мм, диаметр наружного $D_H = 755$ мм. Рабочая длина внутреннего и наружного цилиндрических решет равнялась 1980 мм.

Угловые скорости внутреннего ω_B и наружного ω_H решетчатых цилиндров изменялись преобразователем частоты электрического тока, а измерялись тахометром ТЭМП. Пропускная способность сепаратора в диапазоне от 8 до 20 т/ч регулировалась положением заслонки питающего устройства экспериментального стенда.

Качество очистки зернового материала и потери зерна в отходы определялись по стандартной методике путем разбора проб на ситовом классификаторе УСН-61 в трехкратной повторности. Пробы взвешивали на лабораторных электронных весах CASBEE MV-1200.

Результаты и их обсуждение

Вначале исследовались закономерность движения очищаемого материала по рабочей поверхности внутреннего решета и прохождение зерна через его отверстия. Для упрощения расчетов рассматривалось движение отдельных зерновок. Изменение угловой скорости Ω_B зерновки после попадания на рабочую поверхность внутреннего решета рассчитывалось по предложенной Б. Г. Турбиным [10] формуле:

$$\Omega_B^2 = \frac{2g \cos E}{R_B \cos \varphi} [\cos(\alpha_B - \varphi - E) - \cos(\alpha_0 - \varphi - E) e^{2 \operatorname{tg} \varphi (\alpha_B - \varphi)}],$$

где $E = \arctg 2 \operatorname{tg} \varphi$; g — ускорение силы тяжести; R_B — радиус внутреннего цилиндра; φ — угол трения зерновок о решето; α_B — угол текущего положения зерновки на поверхности внутреннего цилиндра (см. рис. 1, а); α_0 — угол начального положения зерновки на поверхности внутреннего цилиндра.

Попав на внутреннюю поверхность вращающегося цилиндра, зерновка разгоняется до момента выравнивания ее угловой скорости Ω_B с угловой скоростью ω_B цилиндра. После этого зерновка движется вместе с цилиндром. Синхронное вращение зерновки и цилиндра продолжается, пока трансверсальные составляющие силы трения и силы тяжести не достигнут равенства. После этого зерновка замедляется, а ее угловая скорость на данном этапе подчиняется зависимости:

$$\Omega_B^2 = \omega_B^2 + \frac{2g \cos E}{R \cos \varphi} [\cos(\alpha_B - \varphi - E) - \cos(\alpha_{HT} - \varphi - E) e^{2 \operatorname{tg} \varphi (\alpha_B - \alpha_{HT})}],$$

где α_{HT} — угол начала торможения зерновки.

С помощью представленных выше формул рассчитывались значения угловых скоростей Ω_B зерновок, попавших на рабочую поверхность внутреннего цилиндра. Вычисления выполнялись при следующих значениях исследуемых факторов: угол начального положения зерновки на поверхности цилиндра $\alpha_0 = -40 \dots 10^\circ$; угловая скорость внутреннего цилиндра $\omega_B = 3,14 \dots 6,28$ рад/с.

Угловая скорость наружного решета в расчетах принималась $\omega_H = 2,51 \dots 5,02$ рад/с. Здесь максимальные значения угловых скоростей ω_B и ω_H соответствуют предельно допустимой величине показателя кинематического режима цилиндрического решета $K = 1$ [10].

Полученные расчетные значения угловой скорости Ω_B позволяют определить режимы, на которых происходит относительное перемещение зерновки по поверхности решета. Следует отметить, что разность угловых скоростей зерновки и решета еще не гарантирует, что эта зерновка пройдет через его отверстие. Возможно наличие таких зерновок, высокая относительная скорость которых не позволяет им пройти через отверстия, так как за время прохождения зерновки противоположная кромка отверстия ударяет ее и отбрасывает обратно внутрь цилиндра.

Определены максимально допустимые значения угловых скоростей внутреннего решета, при которых возможен проход зерновок через отверстия [14]. На основе полученных данных построена поверхность N на рис. 2, отражающая зависимость максимально допустимой угловой скорости ω_B зерновки при различных значениях угла α_B .

Определение минимально допустимых значений угловых скоростей зерновок, при которых возможен их проход через отверстия решета, выполнялось путем рассечения поверхности N горизонтальными плоскостями M , соответствующими принятым частотам вращения цилиндра. Проецируя полученные в результате пересечения поверхностей N и M линии на горизонтальную координатную плоскость, получаем зависимости минимальных угловых скоростей зерновок $\Omega_{\min}$ от угла α_B .

На основе расчетных значений угловых скоростей Ω_B с учетом принятых ограничений определялись абсолют-

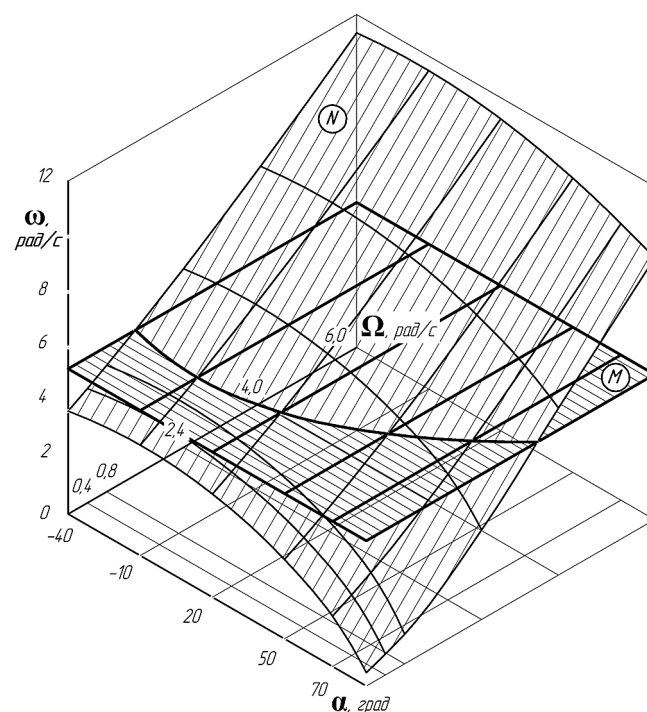


Рис. 2. К определению минимально допустимых угловых скоростей Ω_B зерновок при угловой скорости внутреннего решета $\omega_B = 5,23$ рад/с

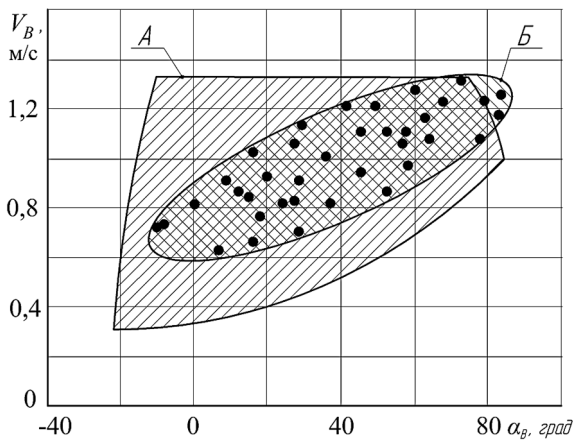


Рис. 3. Скорости V_B зерновок в момент их выхода из отверстий внутреннего решета при значении угловой скорости $\omega_B = 5,23$ рад/с

ные скорости зерновок в момент выхода из отверстий внутреннего решета:

$$V_B = \Omega_B(R_B - b/2),$$

где b — толщина зерновок.

Расчетные значения скоростей V_B зерновок в момент выхода из отверстий внутреннего решета для одной из частот его вращения представлены областью A на рис. 3.

Поскольку в процессе расчетов рассматривалось движение отдельных зерновок по рабочей поверхности внутреннего решета, а при реальном движении они взаимодействуют с другими зерновками, возникла необходимость проверить адекватность полученных математических моделей. Для этого траектории частиц, проходящих через отверстия внутреннего решета, фотографировали и затем обрабатывали [15]. Значения фактических скоростей зерновок в момент выхода из отверстий внутреннего решета представлены областью B на рис. 3.

Сравнивая расчетную A и фактическую B области скоростей, можно отметить, что область B практически вписывается в область A . Сдвиг фактической области скоростей по отношению к расчетной в сторону возрастающих значений α_B можно объяснить перемещением зерновок в слое на большую высоту. Меньший разброс фактических значений скоростей при одинаковых значениях α_B вызван тем, что при движении в слое угловые скорости Ω_B зерновок выравниваются за счет сил внутреннего трения. В целом отметим, что расчетное и фактическое поля скоростей согласуются друг с другом, и полученные результаты применимы для оптимизации совместной работы наружного и внутреннего решет.

После выхода из отверстий внутреннего решета зерновки совершают свободный полет до момента касания с рабочей поверхностью наружного решета. Координаты x и y точки касания зерновки с наружным решетом, а также время t свободного полета частицы находили решением системы уравнений:

$$\begin{cases} x = (R_B - b/2)\sin\alpha_B + \Omega_B t(R_B - b/2)\cos\alpha_B; \\ y = (R_B - b/2)\cos\alpha_B + \Omega_B t(R_B - b/2)\sin\alpha_B + \frac{gt^2}{2}; \\ (x - S_x)^2 - (y + S_y)^2 = R_H^2, \end{cases}$$

где S_x, S_y — смещение осей наружного и внутреннего цилиндрических решет соответственно по горизонтали и вертикали; R_H — радиус наружного цилиндра.

Составляющие абсолютной скорости V_K зерновки в момент касания с наружным решетом по осям x и y равны:

$$\begin{cases} V_x = V_B \cos\alpha_B; \\ V_y = gt - V_B \sin\alpha_B. \end{cases}$$

Тангенциальная составляющая V_T скорости зерновки в момент касания с поверхностью наружного решета:

$$V_T = V_y \sin\alpha_K - V_x \cos\alpha_K,$$

где α_K — угол, характеризующий положение точки касания.

Угловая скорость Ω_K , приобретаемая зерновкой в момент касания с поверхностью наружного решета:

$$\Omega_K = \frac{V_T}{R_K - b/2}.$$

На рис. 4 представлена область B угловых скоростей зерновок в момент касания с наружным решетом, рассчитанных при $\omega_B = 5,23$ рад/с. Анализ полученных областей показал, что с ростом угловой скорости ω_B внутреннего решета длина дуги окружности наружного решета, а значит, и площадь решета, на которой происходит касание зерновок, увеличивается. Так, при изменении угловой скорости ω_B от 3,14 до 6,28 рад/с центральный угол $\Delta\alpha_K$ дуги окружности касания зерновок с наружным решетом увеличивается с 66 до 101°.

Важно, чтобы частицы зерновой смеси после касания с наружным цилиндрическим решетом начали проходить через его отверстия. Для этого необходимо, чтобы скорости зерновок и решета различались, а относительная скорость зерновок была меньше предельного значения, при котором частица не успевает пройти через отверстие решета. Анализ показал, что первое условие выполняется во всем исследованном диапазоне частот вращения внутреннего и наружного цилиндрических

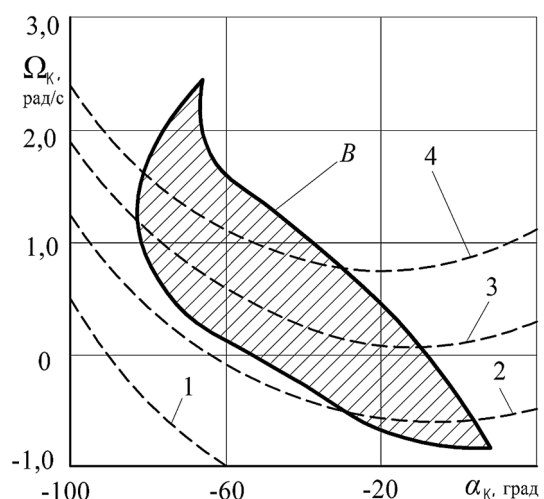


Рис. 4. Область B угловых скоростей Ω_K зерновок в момент касания с наружным решетом и пороговые угловые скорости зерновок при угловой скорости наружного решетного цилиндра ω_B , равной:

1 — 2,51 рад/с; 2 — 3,35 рад/с; 3 — 4,18 рад/с; 4 — 5,02 рад/с

ких решет. Выполнение второго условия определялось расчетом минимально допустимых (пороговых) значений угловых скоростей зерновок по методике [14]. Пороговые значения угловых скоростей зерновок были совмещены с областями их угловых скоростей в момент касания (см. рис. 4).

Установлено, что с ростом частоты вращения наружного решета уменьшается область угловых скоростей зерновок, имеющих возможность прохода через отверстия в момент касания. Однако частица, имеющая после касания с наружным цилиндром угловую скорость ниже порогового значения, ускоряется. Расчеты показывают, что скорость, необходимая для прохода через отверстие, достигается за время перемещения зерновки по дуге цилиндра решета на угол 3–7°. Оптимальные значения угловых скоростей цилиндрических решет составляют: внутреннего $\omega_{\text{в}} = 5,23...6,28$ рад/с; наружного $\omega_{\text{н}} = 4,18...5,02$ рад/с.

В результате длина дуги окружности наружного решета, на которой возможна сепарация от момента касания зерновки до момента ее вхождения в подвижный слой, составляет в зависимости от режимов работы 52–86°. Благодаря этому площадь цилиндрических решет, задействованная в процессе сепарации, увеличивается в 1,34–1,57 раза.

Выводы

Долю площади поверхности цилиндрических решет, используемую в процессе сепарации, можно увеличить на 34–57 % за счет одновременного использования двух цилиндрических решет, которые расположены одно в другом со смещением осей и вращаются в противоположные стороны с разными угловыми скоростями.

Литература и источники

1. Сычугов Н. П., Сычугов Ю. В., Исупов В. И. Машины, агрегаты и комплексы послеуборочной обработки зерна и семян трав: Монография. Киров: ООО "Веси", 2015. 404 с.
2. Ермолев Ю. И. Интенсификация технологических операций в воздушно-решетных зерноочистительных машинах. Ростов-на-Дону: Изд-во ДГТУ, 1998. 493 с.
3. Кожуховский И. Е. Зерноочистительные машины. Конструкция, расчет и проектирование. М.: Машиностроение, 1974. 200 с.
4. Кленин Н. Н., Киселев С. Н., Левшин А. Г. Сельскохозяйственные машины. М.: КолосС, 2008. 647 с.
5. Жолобов Н. В. Технология и технические средства очистки зерна на решетках: Учеб. пособие. Киров: Вятская ГСХА, 2006. 74 с.
6. Schreiber M., Kutzbach H. D. Modellierung des Abscheideverhaltens von Mährescher-Reinigungsanlagen // Landtechnik. 2003, vol. 58, no. 4, pp. 236–237.
7. Гладков Н. Г. Зерноочистительные машины. М.: Машгиз, 1981. 368 с.
8. Choszcz D., Konopka S., Wierzbicki K. The determination of optimum parameters of various kinds of the sieve basket motion of winnowing machine on the cleaning process of mustard seeds // Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu. Rolnictwo. 1996, no. 49, pp. 13–22.
9. Лапшин И. П., Косилов Н. И. Расчет и конструирование зерноочистительных машин. Курган: ГИПП Зауралье, 2002. 168 с.
10. Турбин Б. Г., Лурье А. Б., Григорьев С. М. и др. Сельскохозяйственные машины: Теория и технологический расчет. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1967. 583 с.
11. Whitelock D. P., Anthony W. S. Evaluation of cylinder cleaner grid bar configuration and cylinder speed for cleaning of seed cotton, lint, and lint cleaner waste // Applied engineering in agriculture. 2003, no. 1, pp. 31–37.

12. Якимов А. В. Анализ сепараторов зернового материала с цилиндрическими решетками // Науче нового века — знания молодых: Мат-лы 8-й науч. конф. аспирантов и соискателей. В 2 ч. Киров: Вятская ГСХА, 2008. Ч. 2. С. 95–98.

13. Жолобов Н. В., Якимов А. В., Маишев К. В. Сепаратор зернового вороха. Патент РФ на полезную модель № 56502U1, 2009.

14. Жолобов Н. В., Фарафонов В. Г., Якимов А. В. Согласование работы цилиндрических решет сепаратора зерна // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2012, № 9. С. 34–36.

15. Жолобов Н. В., Якимов А. В., Маишев К. В. Определение параметров траекторий зерновок при работе цилиндрического решета // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: Мат-лы IV междунар. науч.-практ. конф. Киров: Вятская ГСХА, 2011. Вып. 12. С. 35–39.

References

1. Sychugov N. P., Sychugov Yu. V., Isupov V. I. *Mashiny, agregaty i komplekсы posleuborochnoy obrabotki zerna i semyan trav* [Machines, units and complexes for post-harvest handling of grain and grass seeds]. Kirov, ООО "Vesi" Publ., 2015, 404 p.
2. Ermol'ev Yu. I. *Intensifikatsiya tekhnologicheskikh operatsiy v vozdušno-reshetnykh zernoochistitel'nykh mashinakh* [Intensification of technological operations in air-sieve grain-cleaning machines]. Rostov-on-Don, Don State Technical University Publ., 1998, 493 p.
3. Kozhukhovskiy I. E. *Zernoochistitel'nye mashiny. Konstruktsiya, raschet i projektirovanie* [Grain-cleaning machines. Design, calculation and construction]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 200 p.
4. Klenin N. N., Kiselev S. N., Levshin A. G. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny* [Agricultural machines]. Moscow, KolosS Publ., 2008, 647 p.
5. Zholobov N. V. *Tekhnologiya i tekhnicheskie sredstva ochistki zerna na reshetakh* [Technology and technical means for grain cleaning on sieves]. Kirov, Vyatka State Agricultural Academy Publ., 2006, 74 p.
6. Schreiber M., Kutzbach H. D. Modellierung des Abscheideverhaltens von Mährescher-Reinigungsanlagen. *Landtechnik*, 2003, vol. 58, no. 4, pp. 236–237 (in Germ.).
7. Gladkov N. G. *Zernoochistitel'nye mashiny* [Grain-cleaning machines]. Moscow, Mashgiz Publ., 1981, 368 p.
8. Choszcz D., Konopka S., Wierzbicki K. The determination of optimum parameters of various kinds of the sieve basket motion of winnowing machine on the cleaning process of mustard seeds. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu. Rolnictwo*, 1996, no. 49, pp. 13–22.
9. Lapshin I. P., Kosilov N. I. *Raschet i konstruirovaniye zernoochistitel'nykh mashin* [Calculation and design of grain-cleaning machines]. Kurgan, GIPP Zaural'e Publ., 2002, 168 p.
10. Turbin B. G., Lur'e A. B., Grigor'ev S. M. et al. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny: Teoriya i tekhnologicheskii raschet* [Agricultural machines: Theory and process design]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningrad branch, 1967, 583 p.
11. Whitelock D. P., Anthony W. S. Evaluation of cylinder cleaner grid bar configuration and cylinder speed for cleaning of seed cotton, lint, and lint cleaner waste. *Applied engineering in agriculture*, 2003, no. 1, pp. 31–37.
12. Yakimov A. V. Analysis of grain material separators with cylindrical sieves. *Nauke novogo veka — znaniya molodykh: Mat-ly 8-y nauch. konf. aspirantov i soiskateley* [The knowledge of the young for the science of the new century. Proc. of the 8th sci. conf. of post-graduate students and applicants]. Kirov, Vyatka State Agricultural Academy Publ., 2008, part 2, pp. 95–98 (in Russ.).
13. Zholobov N. V., Yakimov A. V., Maishev K. V. *Separatör zernovogo vorokha* [Grain heap separator]. RF utility model no. 56502U1, 2009.
14. Zholobov N. V., Farafonov V. G., Yakimov A. V. Coordination of operation of cylindrical sieves in grain separator. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*, 2012, no. 9, pp. 34–36 (in Russ.).
15. Zholobov N. V., Yakimov A. V., Maishev K. V. Determination of grain's trajectories during the operation of cylindrical sieve. *Uluchsheniye ekspluatatsionnykh pokazateley sel'skokhozyaystvennoy energetiki: Mat-ly IV mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Agricultural energy performance improvement. Proc. of the IV int. sci. and pract. conf.]. Kirov, Vyatka State Agricultural Academy Publ., 2011, no. 12, pp. 35–39 (in Russ.).