

УДК 631.362.3

## Датчик потерь зерна для пневмосепарирующих систем зерноочистительных машин

### Grain loss sensor for pneumatic separation systems of grain-cleaning machines

**Н. В. ЖОЛОБОВ**, канд. техн. наук  
**К. В. МАИШЕВ**, инж.

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

**N. V. ZHOLOBOV**, PhD in Engineering  
**K. V. MAISHEV**, Engineer

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

Одна из причин низкой эффективности использования машин послеуборочной обработки зерна заключается в сложности их настройки на оптимальные режимы функционирования при постоянно изменяющихся входных воздействиях. Исключение ручной корректировки режима работы пневмосистем зерноочистительных машин с заменой на аппаратный контроль и управление технологическим процессом позволит улучшить качество обработки зернового материала и сократить затраты на послеуборочную обработку зерна. Для устройства, контролирующего параметры технологического процесса воздушных систем зерноочистительных машин, разработан датчик потерь зерна в отходы. Работа датчика основана на анализе параметров сигнала звукового давления, возникающего при ударе зерновок, вынесенных вместе с примесями, о стенку осадочной камеры. Датчик разработан на основе недорогого пьезометрического трансдюсера Soho T-1. Он располагается на противоположной стороне стенки, о которую ударяются зерновки, и находится за пределами воздушного потока, насыщенного легкими примесями и пылью. Благодаря этому повышается надежность работы датчика, не нарушается структура воздушного потока в пневмосистеме. Определены параметры звукового сигнала, возникающего при ударе полноценных зерен злаковых культур о стальную стенку осадочной камеры. Исследования проводились на зерне пшеницы, ржи, овса и ячменя; влажность зерна изменялась в диапазоне от 12,6 до 35 %. Выявлены зависимости между параметрами звукового сигнала, возникающего при ударе зерна о стенку осадочной камеры, и величиной потерь зерна в отходы. Работоспособность датчика проверена на экспериментальном образце пневмосепаратора, установленном в линии послеуборочной обработки зерна. Он также может быть адаптирован для работы в воздушных системах других зерноочистительных машин.

**Ключевые слова:** зерноочистительная машина; пневмосепаратор; контроль; датчик потерь зерна; осадочная камера; уровень звукового давления; влажность зерна.

One of the reasons of poor effectiveness of machines for postharvest grain handling is the difficulty of optimal modes setting under constantly changing input actions. Using of hardware check and technological process control instead of manual adjustment will reduce the costs and improve the quality of postharvest grain handling. A grain loss sensor for device of parameter checkout of technological process of pneumatic systems of grain-cleaning machines is developed. Its operation is based on the analysis of parameters of sound pressure signal, that arises when grains blowing together with impurities are hitting against a wall of settling chamber. The sensor design is developed on the basis of Soho T-1 low-cost piezometric transducer. The sensor is located on the outer side of a wall against which grains are hitting, and lies outside the air stream

carrying the impurities and dust. Therefore, the reliability of the sensor increases, and the air stream structure in pneumatic separation system remains steady. The parameters of sound signal arising when grains are hitting against a wall of settling chamber are determined. The researches were conducted with the grains of wheat, rye, oats and barley; the grain moisture content was varied within the range from 12.6 to 35 %. The dependencies between the parameters of sound signal arising when grains are hitting against a wall of settling chamber and the grain loss level have been obtained. The operational capability of the sensor was tested on an experimental model of pneumatic separator installed on postharvest grain handling line. The sensor can be adapted for operation in other pneumatic systems of grain-cleaning machines.

**Keywords:** grain-cleaning machine; pneumatic separator; control; grain loss sensor; settling chamber; sound pressure level; grain moisture.

## Введение

Технологические возможности машин послеуборочной обработки зерна в условиях реального функционирования используются на 30–60 % [1, 2]. Одна из причин их неэффективного использования — сложность настройки машин на оптимальные режимы работы при постоянно изменяющихся входных воздействиях: подаче, влажности, засоренности и физико-механических свойствах. Проблема усугубляется отсутствием необходимых устройств текущего контроля технологического процесса зерноочистки и низким уровнем квалификации операторов. Особенно это касается настройки и поддержания оптимального режима работы пневмосепарирующих систем. При этом не менее половины всех примесей в процессе послеуборочной обработки зерна может быть выделено именно воздушными потоками [3].

Исключение ручной корректировки режима работы пневмосистем зерноочистительных машин с заменой на аппаратный контроль и управление технологическим процессом позволит улучшить качество обработки зернового материала и сократить затраты на послеуборочную обработку зерна. Для этого необходимы простые и надежные устройства, контролирующие параметры технологического процесса очистки зерна. Одно из таких устройств — датчик потерь зерна в отходы.

Существующие тензометрические датчики расхода зерна [4, 5] громоздки, поэтому будут воздействовать на структуру воздушного потока и нарушать технологический процесс. Оптические [6] и мембранные [7] датчики используются преимущественно в зерновых элеваторах зерноуборочных комбайнов для определения урожайности. Приспособить их для работы в воздушной системе зерноочистительной машины весьма затруднительно. Микроволновые [8] расходомеры зерна представляют собой дорогие и довольно сложные системы, а радиоизотопные [9] могут представлять опасность для здоровья обслуживающего персонала в связи с использованием источников гамма-излучения. Кроме того, при применении перечисленных датчиков сложно выделить зерновую составляющую в потоке примесей. Пьезоэлектрические датчики расхода и потерь зерна [10, 11] широко используются в зерноуборочных комбайнах. Однако при размещении этих датчиков в воздушном потоке, насыщенном пылью и примесями, возможны как нарушение структуры воздушного потока, так и выход из строя самих датчиков.

## Цель исследования

Цель исследования — разработка простого, надежного и недорогого датчика потерь зерна в отходы для воздушных систем зерноочистительных машин.

При движении по проточной части пневмосепаратора полноценные зерна, вынесенные вместе с легкими

примесями, контактируют со стенками. Удар зерновок о стальные стенки осадочной камеры или воздуховода происходит на достаточно высокой скорости, в результате чего возникают звуковые импульсы (звонкие щелчки). Определять значение потерь зерна в отходы предлагается на основе анализа параметров данного звукового сигнала [12, 13]. К преимуществам предлагаемого метода относится возможность размещения акустических детекторов (конденсаторного или электретного микрофона, пьезометрического датчика и др.) за пределами воздушного потока с примесями и зерном.

## Материалы и методы

При проведении экспериментальных исследований датчика потерь зерна в отходы использован пневмосепаратор (рис. 1), разработанный в Вятской ГСХА [14].



Рис. 1. Общий вид пневмосепаратора при проведении исследований датчика потерь зерна

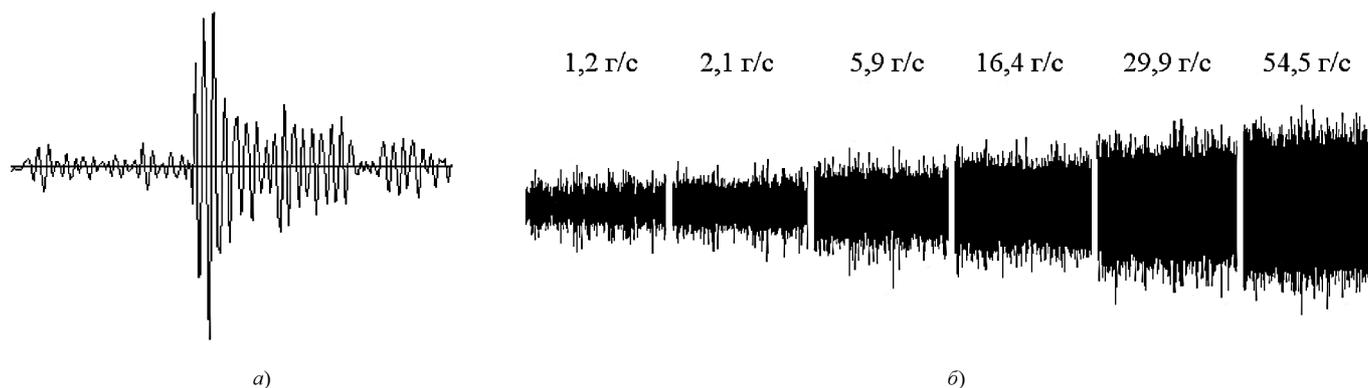


Рис. 2, а, б. Отрезки реализации значения сигнала уровня звукового давления, возникающего при ударе зерновок о стенку осадочной камеры

Для записи параметров звукового сигнала, возникающего при ударе зерновок о стенку осадочной камеры, использован измеритель уровня шума ВШВ-003. Потери зерна в процессе пневмосепарации оценивались по стандартной методике с разбором проб отходов на пневмоклассификаторе К-293.

При ударе отдельной зерновки о стенку осадочной камеры возникает четко фиксируемый импульс звукового давления (рис. 2, а), анализируя характеристики которого, можно оценить потери полноценного зерна в отходы. В момент удара амплитуда сигнала звукового давления резко возрастает, а затем затухает, возвращаясь к прежнему уровню за время  $t = (0,5...0,6) \cdot 10^{-3}$  с. Величина потерь зерна эквивалентна числу ударов зерновок о стенку осадочной камеры. При этом с увеличением потерь зерна в отходы возрастает количество ударов и, соответственно, уровень звукового давления (рис. 2, б).

Необходимо отметить, что работа воздушной системы зерноочистительной машины помимо ударов зерновок о стенки осадочной камеры сопровождается посторонними шумами, возникающими при работе электродвигателя, вентилятора, скольжении очищаемого зернового материала по металлическим поверхностям и т.д. Влияние посторонних шумов на показания датчика потерь зерна необходимо свести к минимуму. Для этого проведен спектральный анализ параметров сигнала звукового давления, возникающего при ударе зерновки о стенку осадочной камеры.

Анализ амплитудно-частотной характеристики (рис. 3) показал, что максимальное значение уровня  $L$  амплитуды звукового давления, возникающего при ударе зерновки о стальную стенку толщиной 1,5 мм, сосредоточено на частоте  $\nu = 7...9$  кГц. Остальные шумы лежат в основном в области как меньших, так и больших частот. Для минимизации влияния посторонних шумов при проведении дальнейших исследований сигнал звукового давления, возникающий при ударе зерновки о стенку осадочной камеры, обрабатывался с использованием октавного фильтра на 8 кГц.

Поскольку использование шумомера в качестве датчика потерь зерна значительно повышает стоимость устройства контроля и управления технологическим процессом, была рассмотрена возможность использования

для записи параметров звукового сигнала пьезометрического трансдюсера Soho Т-1, который дешевле шумомера на два порядка. Трансдюсер закрепляется с наружной стороны стенки осадочной камеры, о которую ударяются зерновки, и воспринимает звуковые импульсы непосредственно от стенки. При этом параметры сигнала, поступающего от трансдюсера Soho Т-1, оказались идентичны характеристикам звука, зафиксированным при использовании шумомера ВШВ-3. Поэтому дальнейшие исследования по разработке датчика потерь зерна проводились с использованием трансдюсера Soho Т-1.

### Результаты и их обсуждение

В ходе исследований установлено, что при очистке в пневмосепарирующей системе семян пшеницы влажностью 12,6 % потери зерна с коэффициентом корреляции 0,99 могут быть рассчитаны по выражению:

$$П_з = 0,159 \exp(0,21p),$$

где  $П_з$  — потери зерна в отходы, г/с;  $p$  — уровень мощности звука удара зерновок о стенку осадочной камеры, дБ.

Аналогичные эксперименты проведены при очистке в воздушной системе семян ржи, ячменя и овса. В об-

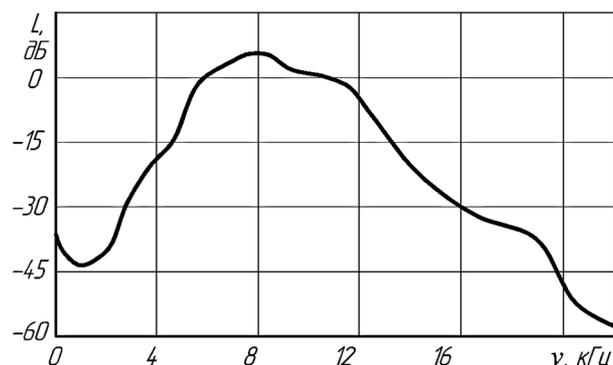
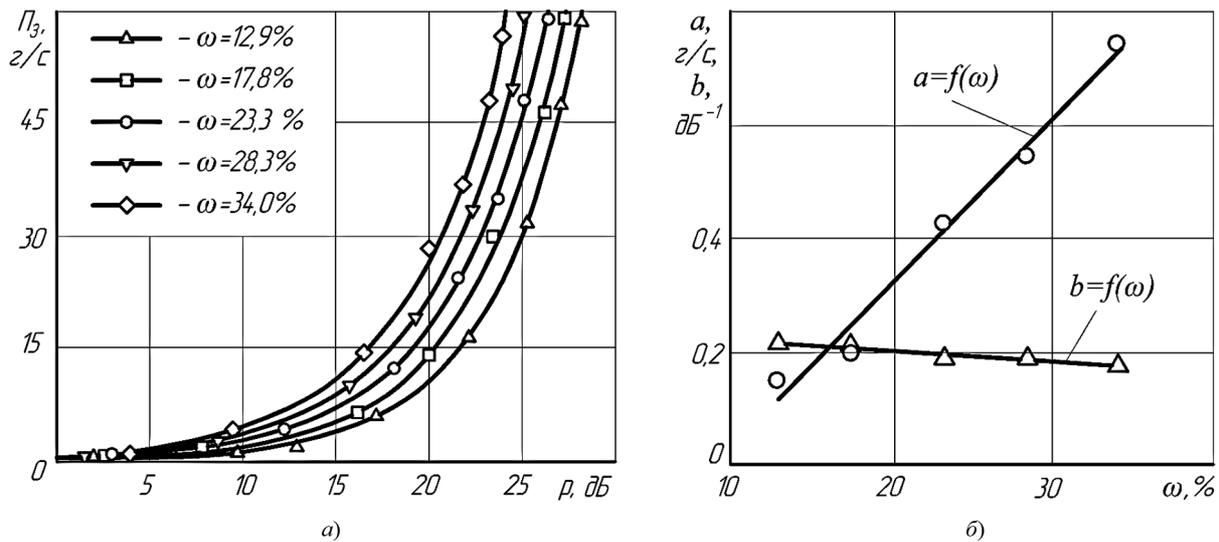


Рис. 3. Спектрограмма параметров звука, возникающего при ударе зерновок о стенку осадочной камеры



**Рис. 4. Влияние влажности  $\omega$  пшеницы на параметры звукового сигнала:**

$a$  — взаимосвязь между уровнем мощности звука  $p$  и потерями зерна  $P_3$  при различной влажности;  $b$  — влияние влажности зерна на значения коэффициентов регрессии

шем виде потери зерна с легкими примесями для указанных культур могут быть определены как:

$$P_3 = a \exp(bp),$$

где  $a, b$  — коэффициенты регрессии, зависящие от вида зерна и его влажности.

Выявлено значительное влияние на параметры сигнала звука удара зерновки о стенку как вида семян очищаемой культуры, так и их влажности. Для обеспечения надежного функционирования датчика потерь зерна в широком диапазоне возможных условий эксплуатации выявлены закономерности изменения коэффициентов регрессии  $a$  и  $b$  в зависимости от вида и влажности обрабатываемой культуры.

С целью экономии ресурсов и исключения влияния посторонних факторов изготовлена экспериментальная установка, которая состоит из бункера с вибродозатором, подающим зерно в вертикальный канал. Под выходным отверстием канала расположена стальная пластина толщиной 1,5 мм с закрепленным на ее нижней стороне трансдюсером Soho T-1. Высота канала выбирается такой, чтобы зерно в момент удара о пластину, имитирующую стенку осадочной камеры, достигло скорости, равной скорости зерновки в момент удара о стенку в машине. Пластина установлена под углом к гори-

зонт, соответствующим углу между вектором скорости зерновки и плоскостью стенки осадочной камеры в момент удара.

Исследования проводились в диапазоне влажности зерна пшеницы  $\omega = 12,9...34$  %, ячменя  $\omega = 12,4...36,1$  %, ржи  $\omega = 13,3...35,6$  %, овса  $\omega = 12,7...34,7$  %. Результаты экспериментальных исследований, полученные для пшеницы, представлены на рис. 4. Закономерности влияния влажности семян других зерновых культур на параметры звукового сигнала удара зерновок о стенку осадочной камеры имеют аналогичный характер.

Уровень звукового давления  $p$ , возникающего в результате удара зерновок о стенку, с увеличением влажности семян  $\omega$  снижается (см. рис. 4, а). Это объясняется снижением твердости зерновок с увеличением их влажности. В целом же закономерность изменения уровня звукового давления в зависимости от величины потерь зерна в отходы, полученная ранее для одной влажности, сохраняет свой общий характер и при других значениях влажности.

Значения коэффициентов регрессии  $a$  и  $b$  корректируются с изменением влажности  $\omega$ :

$$a = c\omega + d;$$

$$b = e\omega + f,$$

где  $c, d, e, f$  — корректирующие коэффициенты.

Значения корректирующих коэффициентов, полученные в результате экспериментальных исследований, приведены в таблице.

**Значения корректирующих коэффициентов**

| Культура | $c$   | $d$    | $e$    | $f$   |
|----------|-------|--------|--------|-------|
| Пшеница  | 0,028 | -0,258 | -0,001 | 0,236 |
| Рожь     | 0,026 | -0,07  | -0,001 | 0,225 |
| Ячмень   | 0,003 | 0,618  | 0,001  | 0,176 |
| Овес     | 0,041 | -0,028 | -0,001 | 0,199 |

### Выводы

Получена модель, позволяющая определить потери зерна в отходы по анализу параметров сигнала звукового давления, возникающего при ударе зерновок о стенку осадочной камеры.

Разработан датчик потерь зерна в отходы на основе недорогого пьезометрического трансдюсера Soho T-1. Работа датчика основана на анализе параметров сигнала звукового давления, возникающего при ударе зерновок, вынесенных вместе с примесями, о стенку осадочной камеры. Датчик может быть использован в устройствах контроля и управления технологическим процессом воздушных систем зерноочистительных машин.

Работоспособность датчика подтверждена испытаниями на пневмосепараторе в линии послеуборочной обработки зерна. Он может быть адаптирован для работы в воздушных системах других зерноочистительных машин.

## Литература и источники

1. **Стрикунов Н. И.** Эффективное использование технологических возможностей зерноочистительных машин // Вестник АГАУ. 2006, № 2. С. 66–67.
2. **Ямпиллов С. С.** Технологическое и техническое обеспечение ресурсо-энергосберегающих процессов очистки и сортирования зерна и семян. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2003. 262 с.
3. **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.
4. **Risius N. W.** Analysis of a combine grain yield monitoring system. Graduate Theses and Dissertations. Paper 13799. Ames, Iowa: Iowa State University, 2014. 92 p.
5. **Hu J., Gong Ch., Zhang Zh.** Dynamic compensation for impact-based grain flow sensor // Computer and computing technologies in agriculture V. Volume 370 of the series IFIP Advances in information and communication technology. Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 210–216. DOI: 10.1007/978-3-642-27275-2\_23.
6. **Andrade-Sanchez P., Heun J. T.** Yield monitoring technology for irrigated cotton and grains in Arizona: Hardware and software selection. Bulletin AZ1596. The University of Arizona — Cooperative Extension. Tucson, Arizona, 2013.
7. **Schrock M. D., Oard D. L., Taylor R. K.** et al. A diaphragm impact sensor for measuring combine grain flow // Applied engineering in agriculture. 1999, vol. 15 (6), pp. 639–642. DOI: 10.13031/2013.5830.
8. **Microwave** type flow sensor KFD series // Kansai Automation Co., Ltd. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.kansai-automation.co.jp/eng/products/pdf/MF\\_MF2-006-0707E.pdf](http://www.kansai-automation.co.jp/eng/products/pdf/MF_MF2-006-0707E.pdf) (дата обращения 10.02.2016).
9. **Moore M. R.** An investigation into the accuracy of yield maps and their subsequent use in crop management. PhD thesis. Silsoe College, Cranfield University, 1998.
10. **Liang Zh., Li Ya., Zhao Zh.** et al. Structure optimization of a grain impact piezoelectric sensor and its application for monitoring separation losses on tangential-axial combine harvesters // Sensors. 2015, no. 15 (1), pp. 1496–1517. DOI: 10.3390/s150101496.
11. **Veal M. W.** Enhanced grain crop yield monitor accuracy through sensor fusion and post-processing algorithms. University of Kentucky doctoral dissertations. Paper 249. 2006, 211 p.
12. **Жолобов Н. В., Маишев К. В., Блинов Б. Ю.** и др. Пневмосепаратор для очистки зернового материала: Патент РФ на полезную модель № 134458, 2013. 5 с.
13. **Жолобов Н. В., Маишев К. В., Жолобов А. Н.** Выявление взаимосвязи между потерями зерна в отходы и звуковым сигналом при работе пневмосепаратора // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: Мат-лы IV междунар. науч.-практ. конф. Киров: Вятская ГСХА, 2010. Вып. 11. С. 80–84.

14. **Жолобов Н. В., Блинов Б. Ю., Маишев К. В.** Ресурсосберегающий пневмосепаратор // Сельский механизатор. 2013, № 6. С. 12–15.

## References

1. Strikunov N. I. Effective use of technological capabilities of grain cleaning machines. *Vestnik AGAU*, 2006, no. 2, pp. 66–67 (in Russ.).
2. Yampilov S. S. *Tekhnologicheskoe i tekhnicheskoe obespechenie resurso-energoberegayushchikh protsessov ochistki i sortirovaniya zerna i semyan* [Technological and technical support of resource-saving and energy-saving processes of cleaning and sorting of grains and seeds]. Ulan-Ude, East-Siberian State Technological University Publ., 2003, 262 p.
3. 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.
4. Risius N. W. *Analysis of a combine grain yield monitoring system*. Graduate Theses and Dissertations. Paper 13799. Iowa State University. Ames, Iowa, 2014, 92 p.
5. Hu J., Gong Ch., Zhang Zh. Dynamic compensation for impact-based grain flow sensor. *Computer and computing technologies in agriculture V*. Volume 370 of the series IFIP Advances in information and communication technology. Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 210–216. DOI: 10.1007/978-3-642-27275-2\_23.
6. Andrade-Sanchez P., Heun J. T. *Yield monitoring technology for irrigated cotton and grains in Arizona: Hardware and software selection*. Bulletin AZ1596. The University of Arizona — Cooperative Extension. Tucson, Arizona, 2013.
7. Schrock M. D., Oard D. L., Taylor R. K., Eisele E. L., Zhang N., Suhardjito, Pringle J. L. A diaphragm impact sensor for measuring combine grain flow. *Applied engineering in agriculture*. 1999, vol. 15 (6), pp. 639–642. DOI: 10.13031/2013.5830.
8. Microwave type flow sensor KFD series. *Kansai Automation Co., Ltd.* URL: [http://www.kansai-automation.co.jp/eng/products/pdf/MF\\_MF2-006-0707E.pdf](http://www.kansai-automation.co.jp/eng/products/pdf/MF_MF2-006-0707E.pdf) (accessed 10.02.2016).
9. Moore M. R. *An investigation into the accuracy of yield maps and their subsequent use in crop management*. PhD thesis. Silsoe College, Cranfield University, 1998.
10. Liang Zh., Li Ya., Zhao Zh., Xu L. Structure optimization of a grain impact piezoelectric sensor and its application for monitoring separation losses on tangential-axial combine harvesters. *Sensors*, 2015, no. 15 (1), pp. 1496–1517. DOI: 10.3390/s150101496.
11. Veal M. W. *Enhanced grain crop yield monitor accuracy through sensor fusion and post-processing algorithms*. University of Kentucky doctoral dissertations. Paper 249. 2006, 211 p.
12. Zholobov N. V., Maishev K. V., Blinov B. Yu., Zholobov A. N. *Pnevmoseparator dlya ochistki zernovogo materiala* [Pneumatic separator for cleaning grain material]. RF utility model no. 134458, 2013, 5 p.
13. Zholobov N. V., Maishev K. V., Zholobov A. N. Revealing the relationship between grain losses and an audible signal during the operation of pneumatic separator. *Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazateley sel'skokhozyaystvennoy energetiki: Mat-ly IV mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Improvement of operational indicators of agricultural energy sector. Proc. of the IV int. sci. and pract. conf.]. Kirov, Vyatka State Agricultural Academy Publ., 2010, no. 11, pp. 80–84 (in Russ.).
14. Zholobov N. V., Blinov B. Yu., Maishev K. V. Resource-saving pneumatic separator. *Sel'skiy mekhanizator*, 2013, no. 6, pp. 12–15 (in Russ.).