

ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЫДЕЛЕНИЯ ЛЕГКОЙ ПРИМЕСИ В ВЕРТИКАЛЬНО ВОСХОДЯЩЕМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Хамуев В.Г., канд. техн. наук

Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 1-й Институтский проезд, 5, Москва, 109428, Российская Федерация, e-mail: victor250476@yandex.ru

В каналах пневмосепараторов с вертикальной подачей воздушного потока процесс выделения легкого компонента является случайным по причине неправильной формы зерновок и неравномерности распределения воздушного потока по поперечному сечению канала. Поэтому сепарируемый компонент, подлежащий уносу, не может быть полностью выделен за любое конечное время воздействия воздушного потока. Это подтверждает математическая модель, адекватно описываемая функцией гамма-распределения с аргументами, один из которых – параметр интенсивности выделения легкого компонента, имеющий большое значение. Подобно тому, как движение материальной точки определяют ее скоростью в каждый момент времени, так и процесс пневмосепарации характеризуют интенсивностью выноса легкого компонента. Показали, что этот параметр имеет физический смысл, открывающий возможность интенсификации процесса пневмосепарации, что не было исследовано в достаточной мере. Изучили влияние зерновой нагрузки на интенсивность процесса разделения материала в вертикально восходящем воздушном потоке. Установили, что увеличение удельной зерновой нагрузки в пневмосепарирующем канале с вертикально восходящим воздушным потоком сопровождается повышением интенсивности выделения легкой примеси, что объясняется возрастанием скорости воздушного потока в межзерновом пространстве. Выявили, что на обработке ячменя при удельной зерновой нагрузке от 0,5 до 2 кг на кв. см в час интенсивность выделения примеси (овса) возрастает в зависимости от нагрузки линейно. Если бы интенсивность процесса сепарации при увеличении нагрузки от 0,5 до 2 кг на кв. см в час сохранялась такой же, как при нагрузке 0,5 кг на кв. см в час, то расчетная полнота выделения овса при нагрузке 2 кг на кв. см в час снизилась бы с 51,97 процента (результат опыта) до 9,83 процента. Получили, что на эффективность сепарации в пневмосепарирующем канале влияет изменение зерновой нагрузки.

Ключевые слова: пневмосепарация, интенсивность выноса легкой примеси, скорость воздушного потока, удельная зерновая нагрузка, полнота выделения примеси, полная гамма-функция. DOI 10.22314.2073-7599-2016.5.12-16

■ Для цитирования: Хамуев В.Г. Интенсивность выделения легкой примеси в вертикально восходящем воздушном потоке // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. N5. С. 12-16.

INTENSITY OF LIGHT IMPURITIES SEPARATION IN VERTICALLY ASCENDING AIR FLOW

V.G. Khamuev, Cand. Sci. (Eng.)

All-Russia Research Institute of Mechanization for Agriculture, 1st Institutskiy proezd, 5, Moscow, 109428, Russian Federation, e-mail: victor250476@yandex.ru

In channels of pneumoseparators with vertical giving of an air flow process of separation of an easy component is casual because of a wrong form of caryopsis and irregularity in the distribution of an air stream on the cross section of the channel. Therefore the separated component can not be completely allocated for any final time of influence of an air flow. It is confirmed by the mathematical model which is adequately described by function of gamma distribution with arguments one of which is the important parameter of intensity of easy component separation. Just as the movement of a material point is determinet by its speed in each timepoint, and process of pneumoseparation is characterized on intensity of extraction of an easy component. The authors showed that this parameter makes the physical meaning opening possibility of an intensification of process of pneumoseparation that was not investigated adequately. Influence of grain charge on intensity of process of separation in vertically ascending air flow was studied. It is established that the increase in specific grain charge in the pneumoseparating channel with vertically ascending air flow is followed by increase of intensity of light impurities separation that can be explained by increase of speed of an air stream in intergrain space. When processing of barley at specific grain charge from 0.5 to 2 kg on sq. cm an hour intensity of impurity (oats) release increases depending on loading linearly. If intensity of process of separation at increase in loading from 0.5 to 2 kg on sq. cm per

hour remained same as at charge of 0.5 kg of sq. cm per hour, settlement separation of oats at charge of 2 kg of sq. cm per hour would decrease from 51.97 percent (result of experience) to 9.83 percent. So, efficiency of separation with use of the pneumoseparating channel depend on change of grain charge.

Keywords: Pneumoseparation; Intensity of light impurities separation; Air flow speed; Specific grain charge; Impurities separation efficiency; Complete gamma function. DOI 10.22314.2073-7599-2016.5.12-16

For citation: Khamuev V.G. Intensity of light impurities separation in vertically ascending air flow. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2016; 5: 12-16. (In Russian)

Исследованию процесса разделения зернового материала по аэродинамическим свойствам посвящены многие труды ученых [1-5]. В большинстве работ изучали траектории движения зерновок в пневмосепарирующем канале с вертикально восходящим воздушным потоком. В известных работах приведены уравнения движения отдельной зерновки с учетом действующих на нее силы тяжести частицы, воздушного потока, а также от формы зерновки, удара ее о стенки канала. Полученные математические модели в таких случаях приемлемы для описания реальных процессов пневмосепарации при сравнительно малой удельной производительности пневмосепараторов, работающих в условиях элементарной загрузки, когда зерновые частицы не создают помех выносу частиц легкой фракции воздушным потоком.

Поэтому была разработана математическая модель процесса сепарации применительно к реальным условиям использования пневмосортировальных машин высокой производительности [6, 7].

На основе вероятностной схемы поведения легкой частицы в слое зерновок, витающих под воздействием вертикально восходящего воздушного потока, получена математическая модель процесса пневмосепарации зерна. Установлено, что полнота разделения зернового материала в пневмосепарирующем канале, согласно разработанной математической модели, адекватно описывается функцией гамма-распределения с аргументами: параметра интенсивности выделения легкого компонента; продолжительности сепарации (или глубины пневмосепарирующего канала); удельной зерновой нагрузки; факторов, учитывающих физико-механические свойства подлежащих разделению компонентов материала, конструктивных и режимных параметров канала [8-12]:

$$\varepsilon = \frac{1}{\Gamma(g)} \int_0^{\alpha^{\frac{d}{v}}} e^{-x} x^{g-1} dx, \quad (1)$$

где $\Gamma(g) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{g-1} dx$ – полная гамма-функция;

$g = c_1 c_2 q$ – параметр сепарирующего пространства, зависящий от концентрации витающего слоя зерновок, безразмерная величина;

c_1 – параметр, учитывающий физико-механиче-

ские свойства обрабатываемого зернового материала;

c_2 – масштабный параметр, размерность которого обратна размерности произведения $c_1 q$;

q – удельная зерновая нагрузка, кг/(см²·ч);

d – глубина пневмосепарирующего канала, м;

v – скорость перемещения тяжелой фракции зернового материала от передней стенки канала к задней, м/с;

α – интенсивность выноса легких частиц, с⁻¹.

Эта модель позволяет определять полноту разделения при больших нагрузках материала в пневмосепарирующем канале и в тех случаях, когда различие аэродинамических свойств компонентов смеси не столь значительно.

При рассмотрении процесса разделения зерновой смеси воздушным потоком в общем случае (в том числе и при больших нагрузках) понятие интенсивности выноса легких частиц имеет большое значение. Подобно тому как движение материальной точки зависит от ее скорости в каждый момент времени, так и процесс пневмосепарации определяют по интенсивности выноса легкого компонента. Параметр интенсивности выделения легкого компонента, как и другие определяющие аргументы, имеет физический смысл, открывающий возможность интенсификации процесса пневмосепарации, что не было изучено в достаточной мере и требует дополнительных исследований.

Цель исследования – изучение влияния зерновой нагрузки на интенсивность процесса разделения материала в вертикально восходящем воздушном потоке.

Материалы и методы. Исследования проводили на пневмосепарирующей машине ПСМ-10 с модернизированным каналом глубиной 700 мм [13, 14]. Скорость воздуха измеряли в пневмоканале при помощи цифрового термоанемометра DWYER серии 471B. Эффективность разделения материала сепаратором оценивали показателем Г.В. Ньютона и В.Г. Ньютона, определяемым разностью полноты выделения засорителя (овса) и потерь основного компонента (ячменя). Опыты проводили в трехкратной повторности по существующей методике. Относительная ошибка выборочной средней (точность опыта) составила менее 5%, при доверительной вероятности 0,9.

Через установку пропускали двухкомпонентную зерновую смесь влажностью 12,7%, состоящую из зерен ячменя (основной материал) со средней массой 1000 зерен 45,64 г и овса (примесь) массой 529 г, то есть в количестве 925 шт./кг со средней массой 1000 зерен 38,14 г. Удельная зерновая нагрузка составляла 0,501; 1,02; 2,04 кг/(см²·ч), что соответствует производительности машины 2,5; 5,0; 10,0 т/ч. В каждом случае масса выноса легкой фракции не превышала 10% от общего количества пропущенного материала.

Интенсивность выноса легких частиц определяли по формуле (1) посредством пакета прикладных программ *MatLab 2015a 8.5 PRO*.

Скорость витания семян и примеси исходного материала определяли на ротаметрическом пневмокласификаторе РПК-30. Из исходного материала проводили отбор необходимого количества семян ячменя и их трудноотделимых примесей семян овса. Отобранные зерна пропускали через установку при разных скоростях воздушного потока. При каждом режиме проводили подсчет количества унесенного зерна в штуках. Было обработано 2000 зерен ячменя и 1480 зерен овса.

Результаты и обсуждение. Классификация семян ячменя и овса (примеси), составляющих смесь на пневматическом классификаторе РПК-30, по скорости витания представлена дифференциальными и интегральными полигонами (рис. 1). Как видно по дифференциальным кривым распределения, полигоны частот ячменя и овса перекрываются между собой, то есть смесь, составленная из этих семян, не может быть полностью разделена воздушным потоком. Разделение компонентов без незначительных потерь невозможно. При полном выделении овса потери ячменя могут составлять 66,5%, а эффективность сепарирования составит 33,5% (интегральные кривые распределения). Максимальная эффективность разделения составляет 67,8% при потерях ячменя 22,0% и полноте выделения овса 89,8%.

Исследование эффективности разделения зернового материала в глубоком пневмосепарирующем канале (таблица) показало, что канал эффективно разделяет ячмень и овес. При выделении 69,19 % овса на пневмокласификаторе РПК-30 эффективность разделения $E=56,19\%$, а потери ячменя $\xi=13\%$. При выделении на сепараторе 51,97% овса $E=45,3\%$, а $\xi=6,67\%$. Рассматривая работу сепаратора с этой точки зрения, видим, что при максимальной и минимальной полноте выделения овса эффективность разделения выше, а потери ячменя ниже, чем на РПК-30.

Зная полноту выделения ε (таблица), по формуле (1) при помощи пакета прикладных программ *MatLab 2015a 8.5 PRO* определили произведение интенсивности и времени процесса выделения овса из ячменя (показатель at). По результатам рас-

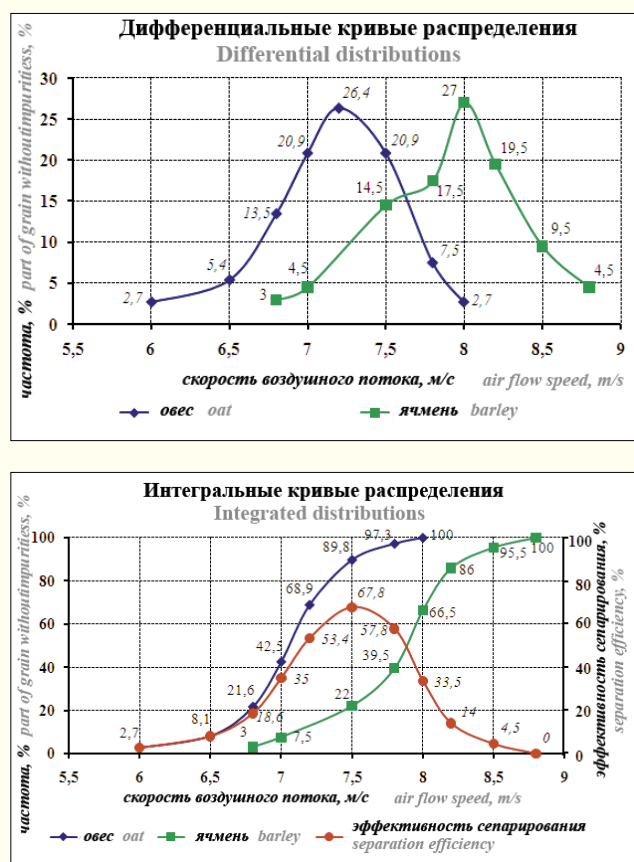


Рис. 1. Вариационные кривые распределения скоростей витания компонентов зерновой смеси

Fig. 1. Variation distributions of terminal velocity of grain mix components

четов, аппроксимируя их, построили зависимость at от удельной зерновой нагрузки q и получили уравнение этой зависимости (рис. 2).

Если учесть, что экспозиция процесса t при любом q одинакова, то интенсивность выделения овса из ячменя при увеличении q от 0,51 до 2,01 кг/(см²·ч) повышается линейно.

Линейное увеличение интенсивности выделения легкого компонента можно объяснить следующим образом. При постоянном расходе воздуха действительная скорость воздушного потока в межзерновом пространстве всегда больше скорости воздушного потока в свободном от материала канале (рис. 3). При повышении удельной зерновой нагрузки уменьшается межзерновое пространство. Это приводит к увеличению скорости воздушного потока в этом пространстве, то есть интенсивность выноса легких частиц возрастает.

О повышении интенсивности выделения вследствие увеличения скорости в межзерновом пространстве можно судить по рисункам 2 и 3, на которых отражено линейное увеличение как интенсивности, так и средней скорости воздушного потока в канале пневмосепаратора с повышением удельной зерновой нагрузки. Разница между угловыми коэффи-

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕПАРИРОВАНИЯ НА ПНЕВМОСЕПАРАТОРЕ ПСМ-10 ПРИ РАЗЛИЧНОЙ УДЕЛЬНОЙ ЗЕРНОВОЙ НАГРУЗКЕ EFFICIENCY OF SEPARATION IN PSM-10 PNEUMOSEPARATOR AT VARIOUS SPECIFIC GRAIN LOADING							
Удельная зер- новая нагруз- ка, кг/(см ² ·ч) Specific grain loading, kg/(sq. cm·h)	Общая масса выноса, кг Full grain weight, kg	Масса ячменя в выносе, кг Including barley weight, kg	Масса 1000 зерен в выносе, г 1000 kernel weight, g		Потери ячменя %, Barley loss, %, %	Полнота выделения ε, % Extraction efficiency, ε, %	Эффектив- ность разде- ления E, % Separation efficiency, E, %
			ячмень barley	овес oat			
0,51	110	71,8	37,98	36,42	5,23	69,19	63,96
1,02	120	88,7	38,36	36,31	6,10	61,67	55,57
2,04	125	98,7	39,22	35,71	6,67	51,97	45,30

циентами этих прямых незначительна.

Насколько существенной является установленная закономерность повышения интенсивности процесса сепарации с увеличением зерновой нагрузки на изменение полноты выделения примеси, можно оценить по данным (рис. 4), где сопоставлены рассчитанные по формуле (1) и экспериментальные значения полноты выделения семян овса из семенного

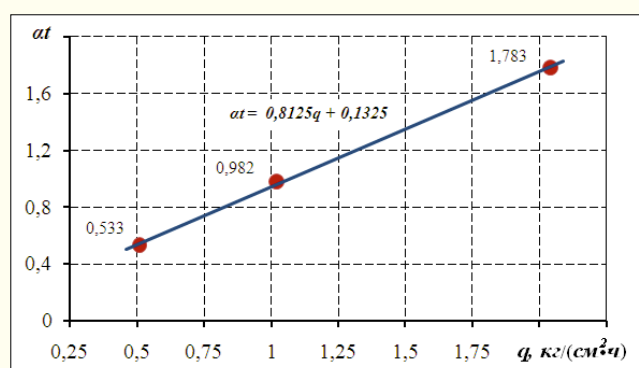


Рис. 2. Зависимость показателя (αt) от удельной зерновой нагрузки (q) на пневмосепараторе ПСМ-10

Fig. 2. Dependence of indicator (αt) on specific grain loading (q) in PSM-10 pneumoseparator

материала ячменя (таблица). Если бы интенсивность процесса сепарации при увеличении нагрузки от 0,5 до 2 кг/(см²·ч) сохранялась такой же, как при нагрузке 0,5 кг/(см²·ч), то расчетная полнота выделения овса при нагрузке 2 кг/(см²·ч) снизилась бы с 51,97% (результат опыта) до 9,83%. Таково положительное влияние изменения нагрузки на эффективность сепарации пневмосепарирующим каналом.

Выводы. Увеличение удельной зерновой нагрузки сопровождается повышением интенсивности выделения примеси, что объясняется возрастанием скорости воздушного потока в межзерновом пространстве. На обработке ячменя при удельной зерновой нагрузке от 0,5 до 2 кг/(см²·ч) интенсивность выделения примеси (овса) линейно возрастает в зависимости от нагрузки. Следует отметить,

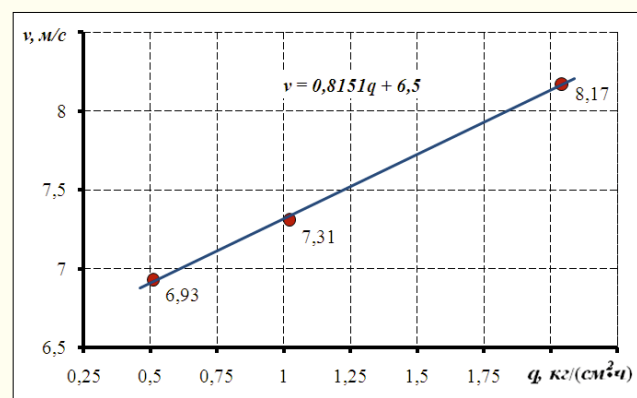


Рис. 3. Зависимость средней скорости воздушного потока (v) в межзерновом пространстве от удельной зерновой нагрузки (q) на пневмосепараторе ПСМ-10

Fig. 3. Dependence of average speed of air stream (v) in intergrain space on specific grain loading (q) in PSM-10 pneumoseparator

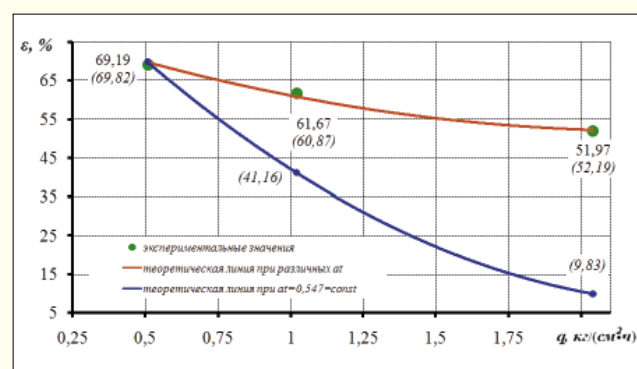


Рис. 4. Зависимость полноты выделения (ϵ) семян овса из ячменя от удельной зерновой нагрузки (q) на пневмосепараторе ПСМ-10

Fig. 4. Dependence of completeness of oats seeds separation (ϵ) from barley on specific grain loading (q) in PSM-10 pneumoseparator

что если бы интенсивность процесса не возрастала при увеличении зерновой нагрузки, а, например, была постоянной, то эффективность разделения снизилась бы в 5 раз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буклагин Д.С., Мишуров Н.П., Гольяпин В.Я., Колчина Л.М., Соловьева Н.Ф., Шилова Е.П., Измайллов А.Ю. Тенденции развития сельскохозяйственной техники // Научно-аналитический обзор (По материалам 7-й международной выставки «Золотая осень-2006») М.: Росинформагротех, 2006: 164 с.
2. Жалнин Э.В. Аксиоматизация земледельческой механики. М.: ВИМ, 2002. 204 с.
3. Doshi J.S., Patel V.B., Patel J.B., Patel J.A. Quantification of Quality Improvement in Wheat Seed Processing. *Journal of Agricultural Engineering*. 2013; Vol. 50; 4: 83-86.
4. Kroulik M., Hula J., Rybka A., Honzik I. Pneumatic conveying characteristics of seeds in a vertical ascending airstream. *Research in Agricultural Engineering*. 2016; 62: 56-63.
5. Łukaszuk J., Molenda M., Horabik J., Szot B., Montross M.D.: Airflow resistance of wheat bedding as influenced by the filling method. *Research in Agricultural Engineering*. 2008; 54: 50-57.
6. Измайллов А.Ю., Лачуга Ю.Ф., Зюлин А.Н. Разработка и внедрение высокоэффективных, ресурсо- и энергосберегающих технологий и технических средств послеуборочной обработки зерна и подготовки семян // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2009. N1. С. 2-8.
7. Зюлин А.Н., Хамуев В.Г. Теоретическое исследование пневмосепарации зернового материала в вертикально восходящем воздушном потоке // Техника в сельском хозяйстве. 2008. N2. С. 3-6.
8. Арсенин В.Я. Математическая физика: основные уравнения и специальные функции. М.: Наука, 1966. С. 225-233.
9. Евграфов М.А. Аналитические функции. М.: Наука, 1968. С. 267-273.
10. Godefroy M. La fonction Gamma; Théorie, Histoire, Bibliographie, Gauthier-Villars, Paris, 1901: 94.
11. Artin E. Einführung in die Theorie der Gammafunktion, Teubner, Leipzig, 1931.
12. Nielson N. Handbuch der Theorie der Gammafunktion, Teubner, Leipzig, 1906.
13. Пат. №2193929 РФ. Канал для сепарации зерна восходящим воздушным потоком / Зюлин А.Н., Бабченко В.Д. Бюл. 2002.
14. Ньютон Г.В., Ньютон В.Г. Исследование эффективности классификации // Труды московского дома ученых. 1937. Вып. 2.

REFERENCES

1. Buklagin D.S., Mishurov N.P., Gol'tyapin V.Ya., Kolchina L.M., Solov'eva N.F., Shilova E.P., Izmaylov A.Yu. Tendentsii razvitiya sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Trends in development of agricultural machinery]. *Nauchno-analiticheskiy obzor (Po materialam 7-y mezhdunarodnoy vystavki «Zolotaya osen'-2006»)*, Moscow: Rosinformagrotekh. 2006. 164. (In Russian)
2. Zhalnin E.V. Aksiomatizatsiya zemledel'cheskoy mekhaniki [Agricultural mechanics axiomatization]. Moscow: VIM, 2002: 204. (In Russian)
3. Doshi J.S., Patel V.B., Patel J.B., Patel J.A. Quantification of Quality Improvement in Wheat Seed Processing. *Journal of Agricultural Engineering*. 2013; Vol. 50; 4: 83-86. (In English)
4. Kroulik M., Hula J., Rybka A., Honzik I. Pneumatic conveying characteristics of seeds in a vertical ascending airstream. *Research in Agricultural Engineering*. 2016; 62: 56-63. (In English)
5. Łukaszuk J., Molenda M., Horabik J., Szot B., Montross M.D.: (2008): Airflow resistance of wheat bedding as influenced by the filling method. *Research in Agricultural Engineering*. 2008; 54: 50-57. (In English)
6. Izmaylov A.Yu., Lachuga Yu.F., Zyulin A.N. Development and implementation of high-performance, resource and energy saving technologies and equipment for postharvest processing of grain and seed preparation. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tehnologii*. 2009; 1: 2-8. (In Russian)
7. Zyulin A.N., Khamuev V.G. Theoretical study grain material pneumoseparation in vertically ascending air flow. *Tekhnika v sel'skom khozyaistve*. 2008; 2: 3-6. (In Russian)
8. Arsenin V.Ya. Matematicheskaya fizika: osnovnye uravneniya i spetsial'nye funktsii [Mathematical physics: main equations and special functions]. Moscow: Nauka, 1966: 225-233. (In Russian)
9. Evgrafov M.A. Analiticheskie funktsii [Analytical functions]. Moscow: Nauka, 1968: 267-273. (In Russian)
10. Godefroy M. La fonction Gamma; Théorie, Histoire, Bibliographie, Gauthier-Villars, Paris, 1901: 94. (In French)
11. Artin E. Einführung in die Theorie der Gammafunktion, Teubner, Leipzig, 1931. (In German)
12. Nielson N. Handbuch der Theorie der Gammafunktion, Teubner, Leipzig, 1906. (In German)
13. Pat. RF No. 2193929. Kanal dlja separacii zerna voshodjashhim vozdushnym potokom [Duct for grain separation by ascending air flow]. Zyulin A.N., Babchenko V.D. 2002. (In Russian)
14. Newton G.V., Newton V.G. Issledovanie effektivnosti klassifikatsii [Study of classification effectiveness]. *Trudy moskovskogo doma uchenykh*, 1937; 2. (In Russian)

Критерии авторства. Автор несет ответственность за представленные в статье сведения и плагиат.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Contribution. The author is responsible for information and plagiarism avoiding.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.