

## Расчет траекторий частиц в пневмосепарирующем канале различными методами

© 2020. А. И. Бурков, А. Л. Глушков, В. А. Лазыкин ✉

ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», г. Киров, Российская Федерация

*Приведено сравнение траекторий частиц в пневмосепарирующем канале (ПСК) фракционного сепаратора семян СП-2Ф и его отводе, рассчитанных методом компьютерного моделирования и двумя экспериментально-теоретическими методами. Последние основаны на учете реального поля скоростей воздушного потока. В одном варианте поле скоростей измеряли в режиме без зерновой нагрузки, во втором – при номинальной зерновой нагрузке. Исследования проводили в разделенном на две части перегородкой вертикальном ПСК с опорной сеткой. В варианте с теоретическим полем скоростей траектории легких и зерновых примесей в I части ПСК смещены ближе к наружной стенке. Во II части канала частицы со скоростью витания 8,0...10,0 м/с выносятся вверх, а со скоростью витания 11,0 м/с падают вниз в очищенный материал. С экспериментальным полем скоростей без зерновой нагрузки частицы со скоростью витания 7,0...10,0 м/с поднимаются вверх во второй части ПСК. В варианте с зерновой нагрузкой частицы со скоростью витания 7,0...9,0 м/с поднимаются вверх и ricochet о внутреннюю стенку ПСК и стенку отвода, а частицы со скоростью витания более 10,0 м/с падают вниз в очищенный материал. В варианте эксперимента с зерновой нагрузкой скорость частиц со скоростью витания 5,0...9,0 м/с при выходе из отвода ПСК в сравнении с другими вариантами более выровненная – 2,3...2,7 м/с, а вектор скорости большинства частиц направлен под меньшим углом к горизонту: от 4° вверх до 17° вниз от горизонтали. Наиболее точным является расчет траекторий частиц с использованием поля скоростей в ПСК при номинальной зерновой нагрузке. Результаты исследования могут быть использованы при теоретическом обосновании конструктивных параметров пневмосистем зерноочистительных машин.*

**Ключевые слова:** пневмосепаратор, теоретический и экспериментально-теоретические методы расчета траекторий частиц, скорость витания

**Благодарности:** работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока (тема № 0767-2019-0094).

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Бурков А. И., Глушков А. Л., Лазыкин В. А. Расчет траекторий частиц в пневмосепарирующем канале различными методами. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020;21(1):62-70. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.1.62-70>

Поступила: 05.11.2019

Принята к публикации: 03.02.2020

Опубликована онлайн: 28.02.2020

## Calculation of particle trajectories in the pneumatic separation channel using various methods

© 2020. Aleksander I. Burkov, Andrei L. Glushkov, Victor A. Lazykin ✉

Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Kirov, Russian Federation

*The article presents the comparison testing of particle trajectories in the pneumatic separation channel (PSC) of the pneumatic seed separator SP-2F and its bend, calculated using computer simulation method and two experimental-theoretical methods. They are based on taking into account the real airflow velocity field. In the first variant, the velocity field was measured in an idle mode, in the second at the nominal grain load. The studies were carried out in a vertical PSC with a supporting grid divided into two parts by a partition wall. In the variant with the theoretical velocity field the trajectories of light and grain impurities in the first part of the PSC are shifted closer to the outer wall. In the second part of the channel, particles with hovering speed of 8.0...10.0 m/s are carried upwards, and with hovering speed of 11.0 m/s they fall down into the purified material. In the variant of the experiment in an idle mode, particles with the hovering speed of 7.0...10.0 m/s rise up in the second part of the PSC. In the variant with grain load, particles with the hovering speed of 7.0...9.0 m/s rise upward and ricochet off the inner walls of the PSC and a bend wall, and particles with the hovering speed of more than 10.0 m/s fall down into the purified material. In the variant of the experiment with the grain load, the particle velocity with the hovering speed of 5.0...9.0 m/s at the exit of the PSC bend is more evened as compared to other options - 2.3...2.7 m/s, and the velocity vector of most particles is directed at a lower angle to the horizontal: from 4° up from the horizontal to 17° down from the horizontal. The most accurate is the calculation of particle trajectories using the velocity field in the PSC at the nominal grain load. The results of the study can be useful in the theoretical substantiation of the design parameters of pneumatic systems of grain cleaning machines.*

**Keywords:** pneumatic separator; theoretical and experimental-theoretical methods of particle trajectories calculation; hovering velocity

**Acknowledgement:** the research was carried out within the state assignment of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (theme No. 0767-2019-0094).

**Conflict of interest:** the authors declare that there is no conflict of interest.

**For citation:** Burkov A. I., Glushkov A. L., Lazukin V. A. Calculation of particle trajectories in the pneumatic separation channel using various methods. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2020;21(1):62-70. (In Russ.). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.1.62-70>

Received: 05.11.2019

Accepted for publication: 03.02.2020

Published online: 28.02.2020

Наиболее распространенным и эффективным способом очистки семян от примесей является обработка воздушным потоком (разделение по аэродинамическим свойствам). Пневмосепарирующие устройства используются на всех стадиях очистки семян как в составе сложных зерно- и семяочистительных машин, так и в виде отдельных машин – пневмосепараторов. При разработке технологических схем пневмосепараторов важно знать траектории частиц зерновой смеси в пневмосепарирующих каналах (ПСК) и их аэродинамические параметры на выходе из отвода канала. Это позволит в первом приближении определить основные конструктивные параметры как самого канала, так и всех основных элементов сепаратора в целом (разделительная камера, пылеосаждающие устройства и др.).

Для расчета траекторий частиц применяют различные методы, в основе которых лежит анализ поля векторов скоростей [1, 2]. При этом поле векторов скоростей описывается известными аналитическими зависимостями, численно моделируется с помощью пакетов прикладных программ или измеряется экспериментальным путем. Проблема заключается в том, что в литературе отсутствуют сведения о сравнении методов расчета траекторий частиц в ПСК и их аэродинамических параметров. В данной статье авторами сравниваются расчетные траектории

частиц в пневмосепарирующем канале и его отводе, полученные при теоретическом описании поля скоростей методом компьютерного моделирования [3, 4] и экспериментально-теоретическими методами [5, 6], что позволит более объективно подойти к выбору метода при расчете траекторий частиц в других элементах пневмосепараторов.

**Цель исследования** – изучить влияние методов расчета траекторий частиц на их координаты, значения и направления векторов скорости в пневмосепарирующем канале.

**Материал и методы.** Объектами исследования являлись процесс очистки семян в вертикальном ПСК и траектории частиц, рассчитанные методом компьютерного моделирования и экспериментально-теоретическими методами.

В начале исследования методом математического моделирования и экспериментальными методами было построено поле скоростей в вертикальном ПСК. Далее были рассчитаны траектории частиц, получены сведения о их местоположении, направлении и значении векторов скоростей на выходе из отвода канала.

За основу был взят вертикальный ПСК фракционного сепаратора семян СП-2Ф (рис. 1) со следующими конструктивными параметрами:  $H_{ПСК} = 0,55$  м,  $h = h_{омв} = 0,3$  м,  $h_1 = 0,21$  м,  $h_{омв.1} = 0,18$  м,  $S = 0,1$  м [7].

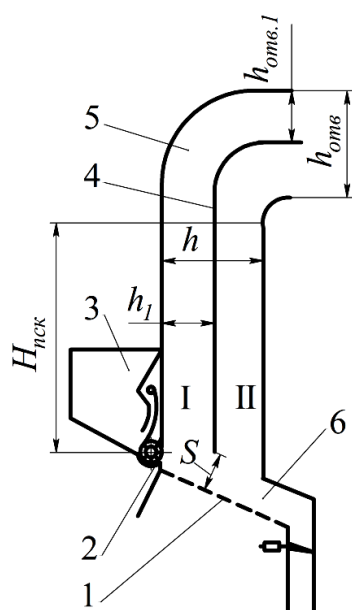


Рис. 1. Схема пневмосепарирующего канала фракционного сепаратора семян СП-2Ф:

- 1 – опорная сетка; 2 – загрузочное окно;
- 3 – устройство ввода материала активного типа;
- 4 – разделительная перегородка;
- 5 – отвод; 6 – выгрузное окно;
- I и II – первая и вторая части ПСК /

Fig. 1. Diagram of the pneumo-separating channel of pneumatic separator of seeds SP-2F:

- 1 – supporting grid; 2 – loading window;
- 3 – input device of the active type of material;
- 4 – partition wall;
- 5 – bend; 6 – discharge window;
- I and II – first and second parts of the PSC

Средняя скорость воздушного потока в первой части канала I составляла 8,5 м/с, во второй части канала II – 12,0 м/с. Она выбиралась по допустимым потерям полноценного зерна в отходы (10%) [8].

Первый метод построения поля скоростей – это метод математического моделирования, основанный на применении современного программного комплекса и на конечно-объемном методе решения уравнений гидродинамики. Для создания геометрии расчетной области пневмосепарирующего канала использовали систему автоматизации проектирования Solid Works [3, 4, 9], затем с помощью дополнительного модуля Flow Simulation [10, 11] были произведены расчет и построение поля. В качестве математической модели выбрали модель турбулентной несжимаемой жидкости. Граничные условия: вход, стенка, выход. Вход – тип свободный, скорость воздушного потока в векторном виде и ее значение по модулю в абсолютной системе координат. Стенка – логарифмический закон изменения скорости в турбулентном пограничном слое. Выход – свободный, нулевое давление.

Второй и третий экспериментальные методы основаны на учете реального поля скоростей воздушного потока. В первом случае поле скоростей измеряли в холостом режиме [5], во втором – при номинальной зерновой нагрузке (удельная подача семян яровой пшеницы 1,85 кг/с на метр ширины) [6].

По результатам измерений и расчетов были получены векторные поля скоростей воздушного потока в ПСК математическим моделированием, экспериментально – при работе вхолостую и с зерновой нагрузкой (рис. 2).

Затем для каждого варианта поля скоростей были рассчитаны траектории частиц компонентов семенного материала, представляющего собой зерновую смесь, состоящую из основной культуры (яровая пшеница), зерновой примеси (щуплое зерно озимой ржи) и легких примесей (древесный опил). Для расчета траекторий была составлена система дифференциальных уравнений второго порядка путем проецирования действующих на частицу в вертикальном воздушном потоке сил на оси неподвижной системы координат  $xOy$ :

$$\begin{cases} \ddot{x} = -k_n(\dot{x} - V_x)\sqrt{(\dot{x} - V_x)^2 + (\dot{y} - V_y)^2}; \\ \ddot{y} = -g - k_n(\dot{y} - V_y)\sqrt{(\dot{x} - V_x)^2 + (\dot{y} - V_y)^2}, \end{cases}$$

где  $k_n$  – коэффициент парусности частицы,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\dot{x}$  и  $\dot{y}$  – проекции абсолютной скорости частицы

на оси координат, м/с;  $V_x$  и  $V_y$  – горизонтальная и вертикальная составляющие скорости воздушного потока, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

При решении данных дифференциальных уравнений значения скоростей воздушного потока определялись системами уравнений, описывающими вертикальные  $V_y$  и горизонтальные  $V_x$  составляющие скоростей в зависимости от расположения частицы в данный момент времени. При расчетах принимали начальную скорость частиц  $V_0 = 0,2$  м/с и угол их ввода в канал, равный  $0^\circ$ . Расчет и построение траекторий проводили с помощью программы MathCAD [12, 13].

По результатам расчета построены траектории частиц компонентов семенного материала в ПСК, определено их местоположение, координаты по высоте патрубка, направление и значение векторов скорости на выходе из отвода пневмосепарирующего канала.

**Результаты и их обсуждение.** Анализируя структуру воздушного потока, следует отметить, что поле скоростей, полученное методом математического моделирования (рис. 2, а), в обеих частях канала достаточно выровненное по глубине на всей прямолинейной части канала, а перераспределение скоростей происходит только в отводе. Это обусловлено тем, что в этом варианте не учтена неравномерность поля скоростей, а расчет и построение производится по среднему значению.

Поля скоростей, полученные экспериментально (рис. 2, б и в), значительно отличаются от математического моделирования, поскольку отражают реальную неравномерность. Причем при зерновой нагрузке воздушный поток более выровненный. При этом направление векторов скоростей на высоте  $y = 0,2 \dots 0,4$  м смещено в сторону наружной стенки в I части канала и разделительной перегородки во II части канала. Данное явление происходит в результате перемещения воздушного потока в зоны меньшего сопротивления.

Рассматривая траектории частиц в канале (рис. 3), можно сделать вывод, что наибольшее влияние на них оказывает равномерность поля скоростей, скорость витания, абсолютная скорость и угол ввода частицы в ПСК. При данной конфигурации ПСК видно, что в его первой части в основном выделяются легкие примеси. Более тяжелые частицы сорной и зерновой примеси перемещаются в сторону разделительной перегородки, тормозятся об нее, а затем падают на движущийся по опорной сетке основной поток очищаемого материала.

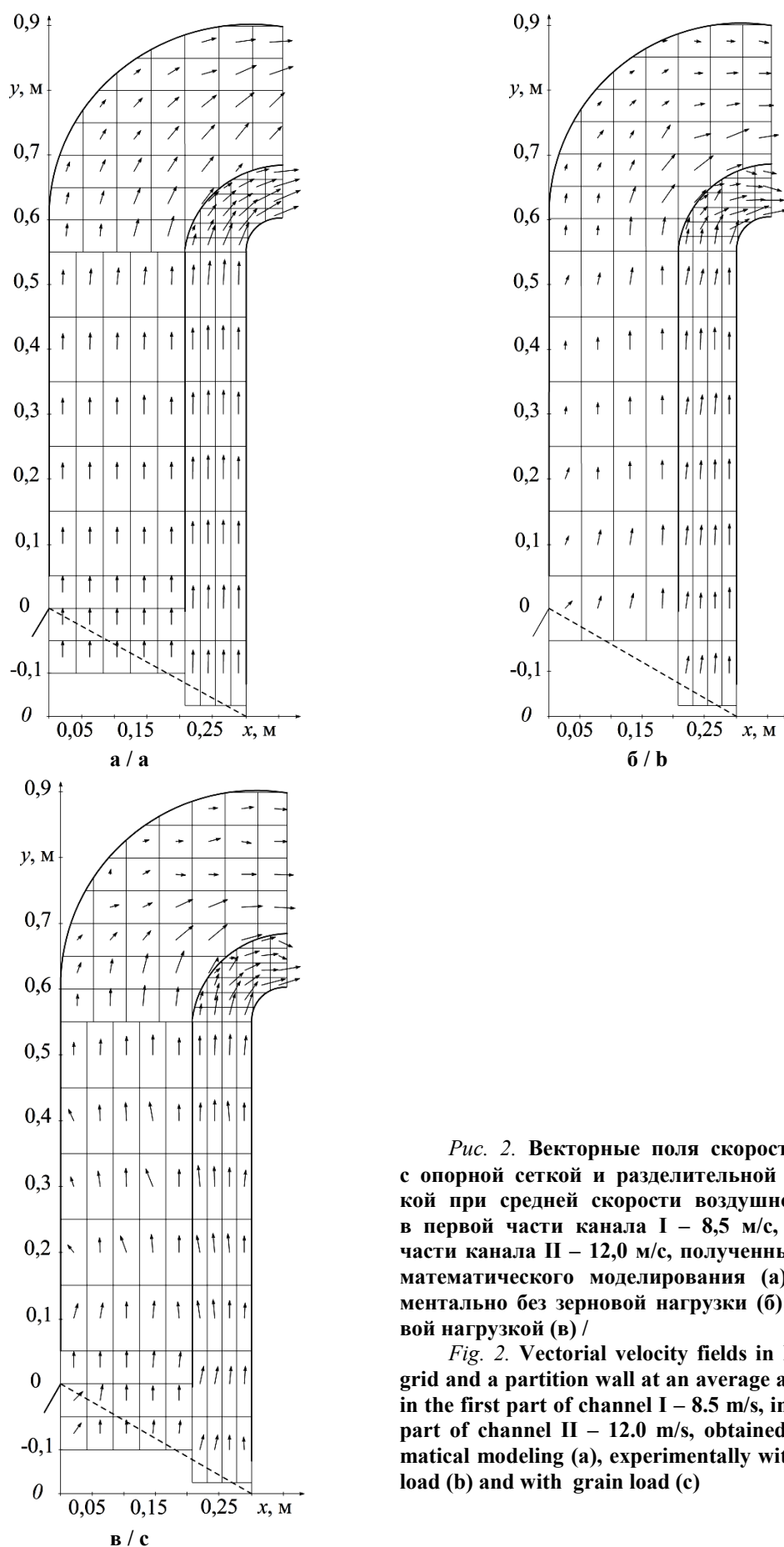
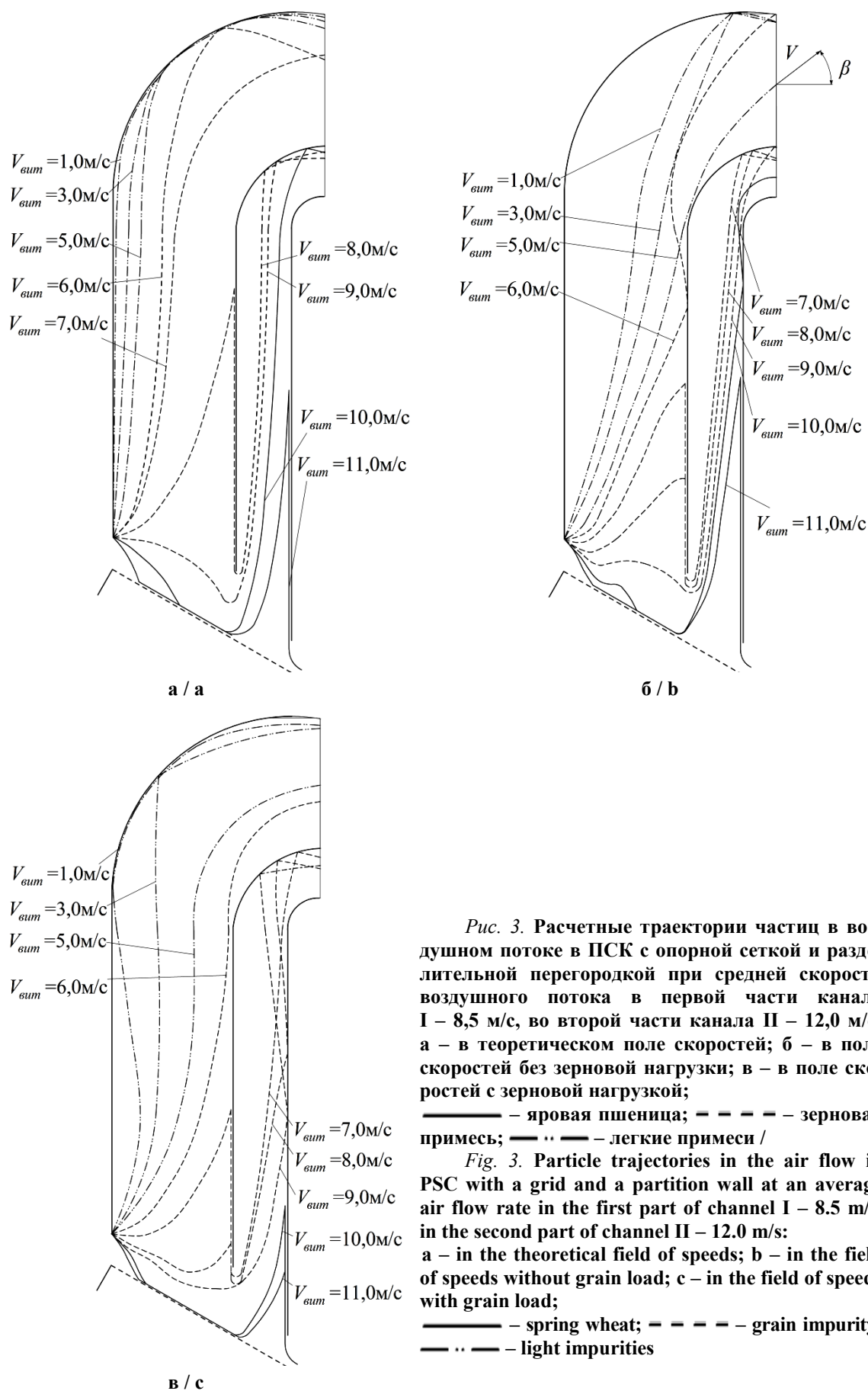


Рис. 2. Векторные поля скоростей в ПСК с опорной сеткой и разделительной перегородкой при средней скорости воздушного потока в первой части канала I – 8,5 м/с, во второй части канала II – 12,0 м/с, полученные методом математического моделирования (а), экспериментально без зерновой нагрузки (б) и с зерновой нагрузкой (в) /

Fig. 2. Vectorial velocity fields in PSC with a grid and a partition wall at an average air flow rate in the first part of channel I – 8.5 m/s, in the second part of channel II – 12.0 m/s, obtained by mathematical modeling (a), experimentally without grain load (b) and with grain load (c)



Во II части канала происходит выделение оставшихся легких и зерновых примесей, а также щуплого, дробленого и мелкого зерна основной культуры. Очищенный материал сходом с опорной сетки через выгрузное окно вы-

водится из канала. Некоторые частицы достигают разделительную перегородку и внутреннюю стенку II части канала под острым углом, рикошетят и продолжают движение вверх с изменившимися составляющими скорости.

*Таблица. Координаты, значение и направление вектора скорости  $V$  частиц при выходе из отвода пневмосепарирующего канала в зависимости от их скорости витания и метода расчета / Table. Coordinates, value and direction of the velocity vector  $V$  of particles at the exit from the outlet of the pneumo-separating channel, depending on their hovering velocity and the calculation method*

Скорость витания частицы $V_{\text{внт}}$ , м/с / Particle hovering velocity $V_{\text{hov}}$ , m/s	Координаты частицы по оси $y$ , м / Coordi- nates of the particle on the $y$ axis, m	Значение скорости $V$ , м/с / Speed value $V$ , m/s	Угол $\beta$ , град / Angle $\beta$ , deg	Значение скорости $V$ по осям координат, м/с / Speed value $V$ for coordinate axes , m/s	
				$V_x$	$V_y$
Поле скоростей в ПСК, полученное с помощью математического моделирования / Velocity field in PSC obtained by mathematical modeling					
1,0	0,84	4,71	-2	4,71	0,16
3,0	0,83	3,83	-4	3,82	0,27
5,0	0,82	3,22	-7	3,20	0,39
6,0	0,77	1,87	-25	1,69	0,79
7,0	0,78	1,48	19	1,40	0,48
8,0	0,63	2,63	14	2,55	0,64
9,0	0,61	1,91	-3	1,91	0,10
10,0	0,62	1,77	-16	1,70	0,49
Поле скоростей в ПСК без зерновой нагрузки / Velocity field in PSC without grain load					
1,0	0,84	1,23	-26	1,11	0,54
3,0	0,84	2,56	-16	2,46	0,71
5,0	0,73	3,00	54	1,76	2,43
6,0	0,85	1,39	-30	1,20	0,70
7,0	0,61	2,55	-11	2,50	0,49
8,0	0,62	1,91	-28	1,69	0,90
9,0	0,63	1,22	-35	1,00	0,70
10,0	0,58	1,24	14	1,20	0,30
Поле скоростей в ПСК при зерновой нагрузке / Velocity field in PSC with grain load					
1,0	0,84	3,61	-4	3,60	0,25
3,0	0,83	3,82	11	3,75	0,73
5,0	0,74	2,33	15	2,25	0,60
6,0	0,71	2,71	15	2,62	0,70
7,0	0,62	2,73	-13	2,66	0,61
8,0	0,60	2,64	-17	2,52	0,77
9,0	0,61	2,33	4	2,32	0,16

В варианте с теоретическим полем скоростей, полученным методом математического моделирования (рис. 3, а), в виду того, что воздушный поток здесь наиболее выровнен по

глубине, и практически отсутствует отклонение векторов скоростей от вертикали, траектории легких и зерновых примесей в I части ПСК смещены ближе к наружной стенке.

Здесь происходит удаление частиц со скоростями витания до 7,0 м/с. Во II части канала частицы со скоростью витания 8,0...10,0 м/с выносятся вверх, а со скоростью витания 11,0 м/с достигают внутреннюю стенку и после контакта с ней падают вниз в очищенный материал. В варианте с экспериментальным полем скоростей без зерновой нагрузки (рис. 3, б) частицы со скоростью витания 1,0...6,0 м/с поднимаются вверх в I части канала, а со скоростью витания 7,0...10,0 м/с – вверх во II части. При этом наблюдаются рикошеты в отводе обеих частей ПСК. Семена со скоростью витания 11,0 м/с, как и в варианте математического моделирования (рис. 3, а), падают после касания стенки на опорную сетку и выводятся из ПСК.

Траектории частиц в экспериментальном поле скоростей при зерновой нагрузке (рис. 3, в) существенно отличаются от других вариантов. Так, частицы со скоростью витания 1,0...6,0 м/с поднимаются вверх в I части канала, равномерно заполняя проточную часть, при этом большинство из них выходит из отвода без рикошета о стенки. Более равномерное распределение скоростей воздушного потока оказывает положительное влияние на траектории частиц и во II части ПСК. Частицы со скоростью витания 7,0...9,0 м/с поднимаются вверх и рикошетируют о внутреннюю стенку ПСК и стенку отвода.

Результаты расчетов по определению координат, значения и направления вектора скорости частиц при выходе из отвода пневмосепарирующего канала в зависимости от скорости витания и метода расчета приведены в таблице.

**Выводы.** Параметры частиц (координаты, значение и направление вектора скорости) при выходе из отвода пневмосепарирующего канала, рассчитанные различными методами, существенно отличаются. В варианте расчета траекторий частиц с использованием экспери-

ментального поля скоростей при номинальной зерновой нагрузке наблюдается равномерное их распределение по высоте отвода I части ПСК, малый диапазон скоростей осаждаемых частиц  $V = 2,3...2,7$  м/с при небольших положительных значениях угла вектора скорости  $\beta = 11...15^\circ$ . При использовании теоретического поля скоростей частицы расположены преимущественно около верхней стенки, имеют существенный диапазон значений угла  $\beta$  вектора скорости от  $-25$  до  $19^\circ$ . При расчете траекторий частиц в экспериментальном поле скоростей без зерновой нагрузки частицы выходят из отвода еще с более широким диапазоном угла  $\beta$  вектора скорости от  $-30$  до  $54^\circ$ . На выходе из отвода II части ПСК в случае расчета траектории в экспериментальном поле скоростей с зерновой нагрузкой частицы имеют небольшой разброс значений угла  $\beta$  векторов скоростей от  $-17$  до  $4^\circ$ , при использовании экспериментального поля без зерновой нагрузки угол  $\beta = -35...14^\circ$ , а теоретического поля скоростей –  $\beta = -16...-14^\circ$ . В варианте с зерновой нагрузкой в очищенный материал поступают частицы со скоростью витания  $V_{\text{внт}} \geq 10,0$  м/с, в других вариантах со скоростью витания  $V_{\text{внт}} \geq 11,0$  м/с. Наиболее точным является экспериментально-теоретический метод, поскольку учитывает реальные условия функционирования машины.

Результаты исследования по определению координат, направления и значения вектора скорости частиц при выходе из отвода пневмосепарирующего канала могут быть использованы при расчете траекторий частиц в разделительной (осадочной) камере пневмосепаратора СП-2Ф, определении ее основных конструктивных параметров и выборе метода расчета траекторий частиц в других элементах пневмосистем зерноочистительных машин.

#### *Список литературы*

1. Бутовченко А. В., Дорошенко А. А., Савченко А. А., Шубин А. И. Использование программного комплекса "FLOWVISION" для определения характеристик воздушного потока в пневмоканале. Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: материалы 7-ой Междунар. науч.-практ. конф. в рамках 17-ой Междунар. агропромышленной выставки "Интерагромаш-2014", 25-27 февр. Ростов н/Д, 2014. С. 52-54.
2. Мударисов С. Г., Бадретдинов И. Д. Оптимизация параметров пневматической системы зерноочистительной машины. Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2011;(1):6-7.
3. Алямовский А. А. Solid Works 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ – Петербург, 2008. 1040 с.
4. Алямовский А. А. Инженерные расчёты в Solid Works Simulation. М.: ДМК Пресс, 2010. 464 с. Режим доступа: <https://www.pdfdrive.com/Инженерные-расчеты-в-solidworks-simulation-e156966405.html>



5. Бурков А.И., Алешкин А.В., Глушков А.Л., Лазыкин В.А. Способ определения траектории движения частицы зернового материала в пневмосепарирующем канале: пат. № 2669053 Российская Федерация. №2017116028: заяв. 04.05.2017; опублик. 08.10.2018. Бюл. №28. 2с. Режим доступа: <https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/669/053/%D0%98%D0%97-02669053-00001/document.pdf>
6. Бурков А. И., Глушков А. Л., Лазыкин В. А. Усовершенствованный экспериментально-теоретический метод расчёта траектории частиц в пневмосепарирующем канале. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2018;(3):87-92. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.64.3.87-92>
7. Бурков А. И., Лазыкин В. А. Фракционный пневматический сепаратор семян СП-2Ф. *Сельский механизатор*. 2016;(3):4-5.
8. Ревякин Е. Л., Антышев Н. М. Технологические требования к новым техническим средствам в растениеводстве. М.: Росинформагротех, 2008. 60 с. Режим доступа: <https://id.b-ok.cc/book/3243361/c765c9>
9. Krzysztof J. Wołosz, Jacek Wernik. Pneumatic pulsator design as an example of numerical simulations in engineering applications. *Central European Journal of Engineering*. 2012;2(1):76-82. DOI: <https://doi.org/10.2478/s13531-011-0050-5>
10. Zhukovetskaya S. Air flowing spatial modeling and simulation with Solidworks CAD. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki i Informatyki*. 2018;13:79–87. URL: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-0e92a018-6f21-48cf-ae47-cf138a92f844>
11. Jiang H, Lu L, Sun K. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of particle deposition in a two-dimensional turbulent channel air flow: study of influence factors: *Indoor Built Environ* 2012;21(2):264-272. DOI: <https://doi.org/10.1177/1420326X11414939>
12. Поршнев С. В., Беленкова И. В. Численные методы на базе Mathcad. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 456 с. Режим доступа: <https://avidreaders.ru/book/chislennyye-metody-na-baze-mathcad-cd.html>
13. Солодов А. П. Mathcad. Дифференциальные модели. М.: МЭИ, 2002. 239 с. Режим доступа: <http://en.bookfi.net/book/719446>

### References

1. Butovchenko A. V., Doroshenko A. A., Savchenko A. A., Shubin A. I. *Ispol'zovanie programmnoy kompleksa "FLOWVISION" dlya opredeleniya kharakteristik vozdushnogo potoka v pnevmokanale. Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: materialy 7-oy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. v ramkakh 17-oy Mezhdunar. agropromyshlennoy vystavki "Interagromash-2014", 25-27 fevr.* [Use of the software complex "FLOWVISION" for determining the characteristics of the air flow in the pneumatic channel. Current state and prospects of agricultural machine building: Proceedings of the 7<sup>th</sup> International scientific and practical agro-industrial exhibition "Interagromash-2014", 25-27 fevr. Rostov n/D, 2014. pp. 52-54.
2. Mudarisov S. G., Badretdinov I. D. *Optimizatsiya parametrov pnevmaticheskoy sistemy zernoochistitel'noy mashiny*. [Optimization of parameters of the pneumatic system of the grain cleaning machine]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2011;(1):6-7. (In Russ.).
3. Alyamovskiy A. A. *Solid Works 2007/2008. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoy praktike*. [Solid Works 2007/2008. Computer modeling in engineering practice]. Saint-Petersburg: BKhV – Peterburg, 2008. 1040 p.
4. Alyamovskiy A. A. *Inzhenernye raschety v Solid Works Simulation*. [Engineering calculations in Solid Works Simulation]. Moscow: DMK Press, 2010. 464 p. URL: <https://www.pdfdrive.com/Инженерные-расчеты-в-solidworks-simulation-e156966405.html>
5. Burkov A. I., Aleshkin A. V., Glushkov A. L., Lazykin V. A. Method for determining the trajectory of a grain material particle in a pneumatic separation channel: Patent RF, no. 2669053, 2017. URL: <https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/669/053/%D0%98%D0%97-02669053-00001/document.pdf>
6. Burkov A. I., Glushkov A. L., Lazykin V. A. *Usovershenstvovanny eksperimental'no-teoreticheskiy metod rascheta traektorii chastits v pnevmosepariruyushchem kanale*. [Improved experimental theoretical method for calculating the trajectory of particles in the pneumo-separating channel]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = *Agricultural Science Euro-North-East*. 2018;(3):87-92. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.64.3.87-92>
7. Burkov A. I., Lazykin V. A. *Fraktsionnyy pnevmaticheskiy separator semyan SP-2F*. [Fractional pneumatic separator of seeds SP-2F]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2016;(3):4-5. (In Russ.).
8. Revyakin E. L., Antyshev N. M. *Tekhnologicheskie trebovaniya k novym tekhnicheskim sredstvam v rastenievodstve*. [Technological requirements for new technical means in crop production]. Moscow: Rosinformagrotekh, 2008. 60 p. URL: <https://id.b-ok.cc/book/3243361/c765c9>
9. Krzysztof J. Wołosz, Jacek Wernik. Pneumatic pulsator design as an example of numerical simulations in engineering applications. *Central European Journal of Engineering*. 2012;2(1):76-82. DOI: <https://doi.org/10.2478/s13531-011-0050-5>



10. Zhukovetskaya S. Air flowing spatial modeling and simulation with Solidworks CAD. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki i Informatyki*. 2018;13:79-87. URL: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/ele-ment/bwmetal.ele-ment.baztech-0e92a018-6f21-48cf-ae47-cf138a92f844>

11. Jiang H, Lu L, Sun K. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of particle deposition in a two-dimensional turbulent channel air flow: study of influence factors: *Indoor Built Environ* 2012;21(2):264-272. DOI: <https://doi.org/10.1177/1420326X11414939>

12. Porshnev S. V., Belenkova I. V. *Chislennyye metody na baze Mathcad*. [Numerical methods based on Mathcad]. Saint-Petersburg: *BKhV-Peterburg*, 2012. 456 p. URL: <https://avidreaders.ru/book/chislennyye-metody-na-baze-mathcad-cd.html>

13. Solodov A. P. *Mathcad. Differentsial'nye modeli*. [Mathcad Differential models]. Moscow: *MEI*, 2002. 239 p. URL: <http://en.bookfi.net/book/719446>

#### **Сведения об авторах**

**Бурков Александр Иванович**, доктор техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией зерно- и семяочистительных машин, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», д. 166а, ул. Ленина, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: [priemnaya@fanc-sv.ru](mailto:priemnaya@fanc-sv.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5287-1532>, e-mail: [burkov.46@mail.ru](mailto:burkov.46@mail.ru)

**Глушков Андрей Леонидович**, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории зерно- и семяочистительных машин, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», д. 166а, ул. Ленина, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: [priemnaya@fanc-sv.ru](mailto:priemnaya@fanc-sv.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1448-9930>

✉ **Лазыкин Виктор Алексеевич**, кандидат техн. наук, научный сотрудник лаборатории зерно- и семяочистительных машин, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», д.166а, ул. Ленина, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: [priemnaya@fanc-sv.ru](mailto:priemnaya@fanc-sv.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3910-8620>, e-mail: [ellestar@bk.ru](mailto:ellestar@bk.ru)

#### **Information about the authors**

**Alexander I. Burkov**, DSc in Engineering, professor, leading researcher, Head of the Laboratory of Grain and Seed Cleaning Machines, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Lenin str., 166a, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: [priemnaya@fanc-sv.ru](mailto:priemnaya@fanc-sv.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5287-1532>, e-mail: [burkov.46@mail.ru](mailto:burkov.46@mail.ru)

**Andrei L. Gluhkov**, PhD in Engineering, senior researcher, the Laboratory of Grain and Seed Cleaning Machines, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Lenin str., 166a, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: [priemnaya@fanc-sv.ru](mailto:priemnaya@fanc-sv.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1448-9930>

✉ **Victor A. Lazukin**, PhD in Engineering, researcher, the Laboratory of Grain and Seed Cleaning Machines, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Lenin str., 166a, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: [priemnaya@fanc-sv.ru](mailto:priemnaya@fanc-sv.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3910-8620>, e-mail: [ellestar@bk.ru](mailto:ellestar@bk.ru)

✉ – Для контактов / Corresponding author