

## МЕХАНИЗАЦИЯ

УДК 631.362.1

doi: 10.30766/2072-9081.2018.64.3.87-92

### **Усовершенствованный экспериментально-теоретический метод расчёта траектории частиц в пневмосепарирующем канале**

**А.И. Бурков, А.А. Глушков, В.А. Лазыкин**

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

*Представлен усовершенствованный экспериментально-теоретический метод (ЭТМ) расчёта траектории частиц в пневмосепарирующем канале (ПСК). Особенностью данного метода является то, что математическое моделирование поля скоростей воздушного потока в зоне сепарации производится на основе измерения их фактических значений при номинальной зерновой нагрузке, а расчёт и построение траекторий частиц выполняется с учётом их рикошета от стенок канала. Усовершенствованный метод включает в себя три этапа. На первом этапе экспериментально измеряется векторное поле скоростей воздушного потока в центрах равноугольных прямоугольников, расположенных в зоне сепарации по всей высоте и глубине ПСК, при номинальной зерновой нагрузке. На втором этапе на основании определённых значений векторов скоростей в центрах прямоугольников составляются математические выражения, описывающие вертикальные и горизонтальные составляющие этих скоростей в соответствующих сечениях по осям координат. На третьем этапе составляется система дифференциальных уравнений движения частицы в ПСК относительно декартовой системы координат, и рассчитываются их траектории. Усовершенствованный ЭТМ повышает точность расчёта траектории частиц в ПСК и аэродинамических параметров частиц на выходе из него, что ускоряет процесс оптимизации конструктивных параметров канала и присоединённых к нему элементов пневмосистемы.*

**Ключевые слова:** *воздушный поток, сепарация компонентов зернового материала, математическое моделирование*

Расчёт траектории частиц компонентов зернового материала в зоне сепарации используется научно-техническими работниками при обосновании конструктивных параметров рабочих органов пневмосистем – сепарирующих каналов, осадочных и разделительных камер, воздухоподводящих и отводящих каналов. Наиболее часто применяется упрощённый метод расчёта [1, 2], при котором рассматривается движение отдельной частицы в равномерном воздушном потоке, направленном параллельно стенкам канала, что приводит к большой погрешности определения траектории частиц и к неправильному выбору параметров пневмосепарирующего канала (ПСК).

Для расчёта поля скоростей воздушного потока в ПСК используются различные методы. В некоторых случаях поле скоростей приближённо описывается аналитическими выражениями, взятыми из теории турбулентных струй [3, 4, 5]. Ю.В. Сычуговым для расчёта поля скоростей воздушного потока в ПСК применён метод конечных элементов [6]. В.А. Лазыкиным для определения поля скоростей в зоне сепарации ПСК использованы системы уравнений, полученные экспериментальным путём на холостом режиме [7]. В последнее время для определения характеристик воздушного потока в элементах пневмосистем

всё чаще используются пакеты прикладных программ и программных комплексов [8, 9, 10]. Расчёт траектории частиц с учётом неравномерности поля скоростей в зоне сепарации на холостом режиме выполняется одним из известных численных методов [11] или с помощью доступного программного пакета [12]. Однако подобные методы не учитывают влияние зернового материала на структуру воздушного потока и большинство из них – рикошет упругих частиц от стенок канала. Отмеченные недостатки обуславливают существенное отклонение расчётной траектории частицы зернового материала от фактической.

**Цель исследований** – усовершенствовать экспериментально-теоретический метод расчёта траектории частиц в ПСК с учётом фактического поля скоростей воздушного потока в зоне сепарации при номинальной зерновой нагрузке.

**Материал и методы.** Объектом исследования являлись процесс очистки семян зерновых и других культур в вертикальном ПСК и ЭТМ расчёта траектории частиц, базирующийся на моделировании поля скоростей в зоне сепарации ПСК при номинальной зерновой нагрузке. ЭТМ включает три этапа. Вначале экспериментально измеряется векторное поле скоростей воздушного потока в центрах

равновеликих прямоугольников, расположенных в зоне сепарации ПСК при номинальной подаче зернового материала. При этом скорость воздушного потока устанавливается по допустимому выносу полноценных зерновок с лёгкими примесями. Количество прямоугольников по вертикали и горизонтали при описании поля скоростей криволинейной функцией должно быть не менее четырёх. Для более точного описания поля скоростей количество точек измерения должно быть максимально возможным по условиям эксперимента. Величина и направление вектора скорости могут быть определены с помощью, например, цилиндрического зонда и микроманометра или других приборов. На рисунке 1 изображена схема разбиения зоны сепарации ПСК в продольно-вертикальной плоскости на 20 прямоугольников – на пять рядов по вертикали (оси  $y$ ) и четыре по горизонтали (оси  $x$ ).

После этого на основании экспериментально определённых значений векторов скоростей в центрах прямоугольников составляются математические выражения (табл. 1), описывающие вертикальные  $V_y$  и горизонтальные  $V_x$  составляющие этих скоростей в соответствующих сечениях по осям координат. Далее составляется система дифференциальных уравнений (например, второго порядка) движения частицы в ПСК относительно декартовой системы координат  $xoy$ :

$$\begin{cases} \ddot{x} = -k_n(\dot{x} - V_x)\sqrt{(\dot{x} - V_x)^2 + (\dot{y} - V_y)^2}; \\ \ddot{y} = -k_n(\dot{y} - V_y)\sqrt{(\dot{x} - V_x)^2 + (\dot{y} - V_y)^2} - g, \end{cases} \quad (1)$$

где  $k_n$  – коэффициент парусности частицы,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\dot{x}$  и  $\dot{y}$  – проекции абсолютной скорости частицы на оси координат,  $\text{м/с}$ ;  $V_x$  и  $V_y$  – горизонтальная и вертикальная составляющие скорости воздушного потока,  $\text{м/с}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Система дифференциальных уравнений (1) решается одним из известных численных методов, например, методом Рунге-Кутты [4, 11]. Для её решения дополнительно вводятся начальные условия:  $t_0 = 0$ ;  $x_0 = 0$ ;  $y_0 = 0$ ;  $\dot{x}_0 = V_{BB} \cos \alpha$ ;  $\dot{y}_0 = V_{BB} \sin \alpha$ . Значения скоростей  $V_x$  и  $V_y$  воздушного потока определяются с помощью уравнений, приведённых в таблице. После решения системы дифференциальных уравнений строится траектория частицы зернового материала.

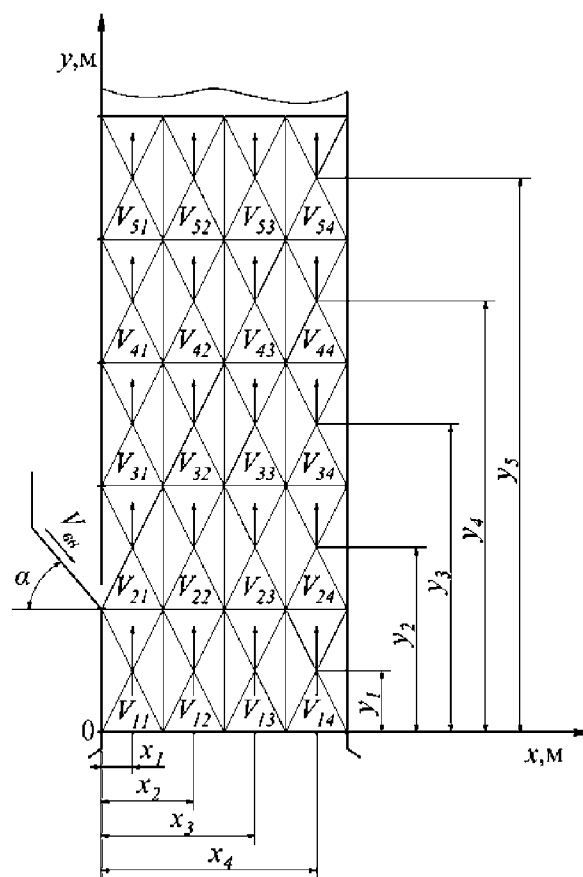


Рис. 1. Схема разбиения зоны сепарации ПСК на 20 прямоугольников

Некоторые частицы при своём движении достигают стенки канала и ударяются о неё. В случае отсутствия трения между частицей и поверхностью стенки канала касательная составляющая скорости после удара остаётся неизменной, а нормальная составляющая скорости изменяет своё направление на противоположное и определяется соотношением Ньютона:

$$V_{2n} = k_e V_{1n}, \quad (2)$$

где  $V_{1n}$  и  $V_{2n}$  – нормальная составляющая скорости частицы до и после удара;  $k_e$  – коэффициент восстановления нормального импульса после удара (определяется экспериментально и может принимать значения от 0 до 1).

Траектория движения частицы зернового материала после соударения со стенкой канала вычисляется и строится с учётом нового значения величины и направления её скорости.

**Результаты и их обсуждение.** По предложенному методу был проведен расчет траекторий движения частиц в вертикальном ПСК (рис. 2). Данный ПСК был разбит на 40 прямоугольников. Замер скоростей воздушного потока проводили при подаче семян яровой пшеницы 1,85 кг/с на метр ширины и средней скорости в

канале  $V = 8,5$  м/с. Для частицы, находящейся в центре каждого прямоугольника, экспериментально определяли направление и величину скорости воздушного потока. Направление воздушного потока определяли визуально с помощью шарнирно закрепленных на стенке канала шелковинок, а значение скорости – с помощью микроманометра ММН-2400 и

трубки Пито-Прандтля. На основе полученных данных было построено поле скоростей (рис. 2, а), рассчитаны значения скоростей  $V_y$  и  $V_x$  воздушного потока по вертикали (при значениях  $x = 0,02; 0,06; 0,10; 0,14; 0,18$  м) и по горизонтали (при значениях  $y = 0,025; 0,075; 0,125; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60$  м).

Таблица 1

**Системы уравнений, описывающие вертикальные  $V_y$  и горизонтальные  $V_x$  составляющие скоростей воздушного потока в продольно-вертикальной плоскости пневмосепарирующего канала**

Вертикальная составляющая скорости $V_y$ , м/с						
$x/y$ , м	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	Уравнение
$x_1$	$V_{y1}$	$V_{y2}$	$V_{y3}$	$V_{y4}$	$V_{y5}$	$V_y = A_{x1}y^2 + B_{x1}y + C_{x1}$
$x_2$	$V_{y1}$	$V_{y2}$	$V_{y3}$	$V_{y4}$	$V_{y5}$	$V_y = A_{x2}y^2 + B_{x2}y + C_{x2}$
$x_3$	$V_{y1}$	$V_{y2}$	$V_{y3}$	$V_{y4}$	$V_{y5}$	$V_y = A_{x3}y^2 + B_{x3}y + C_{x3}$
$x_4$	$V_{y1}$	$V_{y2}$	$V_{y3}$	$V_{y4}$	$V_{y5}$	$V_y = A_{x4}y^2 + B_{x4}y + C_{x4}$
Горизонтальная составляющая скорости $V_x$ , м/с						
$y/x$ , м	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$		Уравнение
$y_1$	$V_{x1}$	$V_{x2}$	$V_{x3}$	$V_{x4}$		$V_x = A_{y1}x^2 + B_{y1}x + C_{y1}$
$y_2$	$V_{x1}$	$V_{x2}$	$V_{x3}$	$V_{x4}$		$V_x = A_{y2}x^2 + B_{y2}x + C_{y2}$
$y_3$	$V_{x1}$	$V_{x2}$	$V_{x3}$	$V_{x4}$		$V_x = A_{y3}x^2 + B_{y3}x + C_{y3}$
$y_4$	$V_{x1}$	$V_{x2}$	$V_{x3}$	$V_{x4}$		$V_x = A_{y4}x^2 + B_{y4}x + C_{y4}$
$y_5$	$V_{x1}$	$V_{x2}$	$V_{x3}$	$V_{x4}$		$V_x = A_{y5}x^2 + B_{y5}x + C_{y5}$

После математической обработки получены уравнения (табл. 2), описывающие изменение скоростей воздушного потока в ПСК по вертикали и горизонтали.

Принимая начальную скорость  $V_{\text{вв}} = 0,2$  м/с и угол ввода частиц в канал  $\alpha_1 = 0^\circ$ , решаем систему уравнений (1). При решении данных дифференциальных уравнений подставляем в них значения скоростей воздушного потока, определяемые по уравнениям таблицы 2 в зависимости от расположения частицы в данный момент времени. Расчет и построение траекторий вели при помощи программы Mathcad. Расчетные траектории движения частиц компонентов семенного материала яровой пшеницы изображены на рисунке 2, б.

Легкие примеси со скоростями вита-

ния  $V_{\text{вв}} = 1,0...5,0$  м/с и зерновая примесь со скоростью  $V_{\text{вв}} = 6,0$  м/с поднимаются вверх по крутым траекториям не соприкасаясь со стенками канала. Частицы зерновой примеси со скоростью  $V_{\text{вв}} = 7,0$  м/с движутся вверх по менее крутой траектории, ударяются о противоположную стенку, тормозятся о нее и падают вниз. Частицы зерновой примеси, имеющие скорость  $V_{\text{вв}} = 8,0$  м/с, сначала перемещаются вниз по пологой траектории, а затем попадают в зону высоких скоростей и поднимаются вверх в сторону противоположной стенки, ударяются об нее и падают вниз. Частицы семян пшеницы со скоростями витания  $V_{\text{вв}} = 9,0...11,0$  м/с после ввода в ПСК движутся вниз в сторону противоположной стенки и выходят наружу.

Таблица 2

Системы уравнений, описывающие изменение скоростей  $V_y$ ,  $V_x$  воздушного потока в ПСК

Вертикальная составляющая скорости $V_y$ , м/с									
$x/y$ , м	0,025	0,075	0,125	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	Уравнение
0,02	5,92	4,43	7,88	7,20	3,66	4,86	5,67	6,26	$V_{ey} = 9,21y^2 - 4,53y + 5,90$
0,06	7,67	7,85	7,88	7,55	7,22	7,59	7,88	7,87	$V_{ey} = 4,62y^2 - 1,78y + 7,67$
0,10	7,45	7,67	8,28	8,08	8,14	9,21	9,02	9,21	$V_{ey} = -2,35y^2 + 4,03y + 7,83$
0,14	7,42	7,23	8,25	8,44	8,82	8,71	9,25	9,90	$V_{ey} = -1,88y^2 + 4,81y + 7,77$
0,18	7,20	7,45	7,64	8,08	8,28	8,48	8,08	8,48	$V_{ey} = -6,01y^2 + 4,46y + 7,58$
Горизонтальная составляющая скорости $V_x$ , м/с									
$y/x$ , м	0,02	0,06	0,1	0,14	0,18	Уравнение			
0,025	4,15	0,00	0,00	0,65	0,63	$V_{ex} = 397x^2 - 95,44x + 5,38$			
0,075	4,43	0,69	0,00	0,00	0,00	$V_{ex} = 364,5x^2 - 96,75x + 5,88$			
0,125	0,00	0,00	0,00	0,72	0,67	$V_{ex} = 27,41x^2 - 0,34x - 0,05$			
0,2	1,93	1,33	0,00	0,74	-0,70	$V_{ex} = 16,87x^2 - 18,01x + 2,24$			
0,3	-3,07	-0,38	-2,96	-0,77	0,00	$V_{ex} = 41,6x^2 - 6,06x - 2,59$			
0,4	-1,58	-1,07	-0,33	-3,52	0,00	$V_{ex} = 93,3x^2 - 16,89x - 0,84$			
0,5	-2,65	0,00	-0,47	-1,63	-0,14	$V_{ex} = -133,7x^2 + 35,19x - 2,73$			
0,6	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00	$V_{ex} = -12,27x^2 + 1,77x + 0,04$			

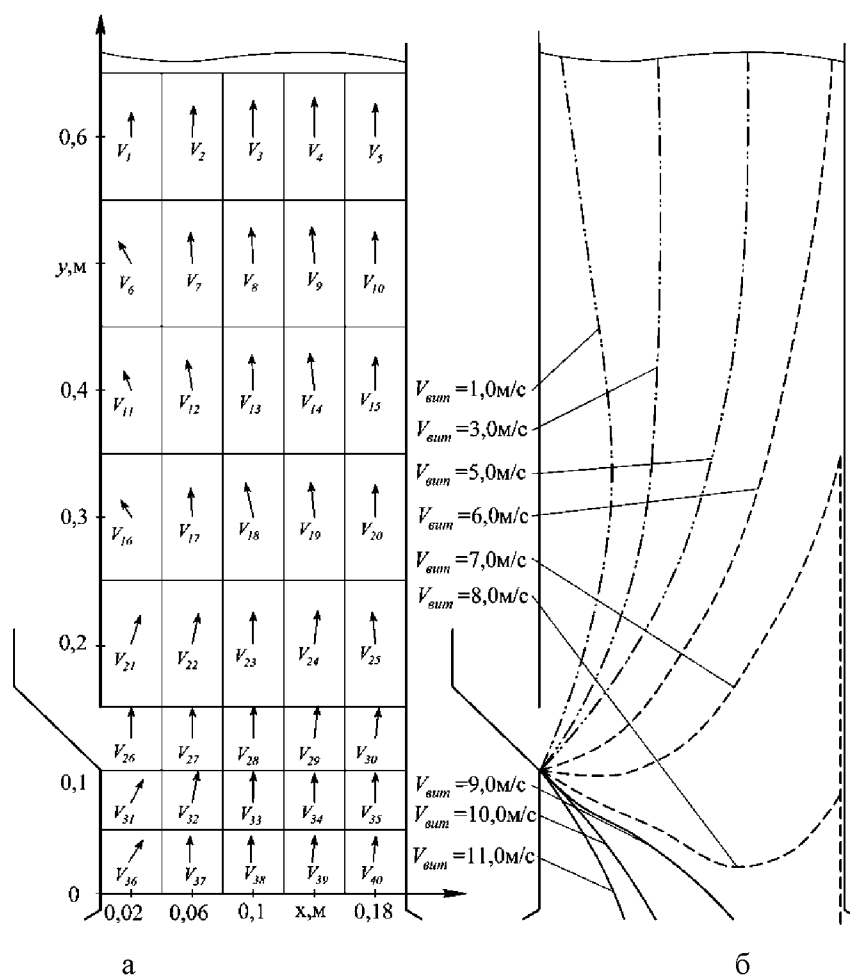


Рис. 2. Поле скоростей воздушного потока (а) и расчетные траектории движения частиц (б) в ПСК при средней скорости воздушного потока  $V = 8,5$  м/с;  
 — — — — — яровая пшеница; - - - - - зерновая примесь; — · — · — — — — — легкие примеси

**Заключение.** В результате применения усовершенствованного ЭТМ расчета повышается точность определения траектории частиц зернового материала в ПСК, скорости и направления движения частиц на выходе из ПСК, что будет способствовать более точному определению конструктивных параметров элементов пневмосистемы, присоединённых к нему (отвод, осадочная, разделительная камеры, пылеуловитель и др.).

#### Список литературы

1. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1980. С. 161-181.
2. Нелюбов А.И., Ветров В.Ф. Пневмосепарирующие системы сельскохозяйственных машин. М.: Машиностроение, 1977. 192 с.
3. Бурков А.И., Глушков А.Л. Анализ траекторий движения компонентов зернового вороха в наклонном пневмосепарирующем канале // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: сб. науч. тр. Киров: ФГБОУ ВО Вятская ГСХА, 2005. Вып. 5. С. 102-108.
4. Сусуев В.А., Алёшкин А.В., Кормицков А.Д. Методы механики в сельскохозяйственной технике. Киров: Кировская областная типография, 1997. С. 7-23.
5. Сайтов В.Е., Суворов А.Н., Фарафонов В.Г. Математическая модель движения частицы в прямолинейном пневмосепарирующем канале с учетом неравномерности структуры воздушного потока // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: материалы VI Междун. научн.-практ. конф. «Наука-Технология-Ресурсосбережение». Киров: ФГБОУ ВО Вятская ГСХА, 2013.

#### Сведения об авторах:

Бурков Александр Иванович, доктор техн. наук, профессор, гл. научный сотрудник, e-mail: burkov.46@mail.ru, Глушков Андрей Леонидович, кандидат техн. наук, ст. научный сотрудник, Лазыкин Виктор Алексеевич, кандидат техн. наук, мл. научный сотрудник

ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого», ул. Ленина, д. 166а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru

*Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka, 2018. Vol. 64, no. 3, pp. 87-92.*

doi: 10.30766/2072-9081.2018.64.3.87-92

#### **An improved experimental-theoretical method for calculating the particle trajectory in a pneumatic separating channel**

**A.I. Burkov, A.L. Glushkov, V.A. Lazykin**

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

The article presents an improved experimental-theoretical method for calculating the particle trajectory in a pneumatic separating channel. Mathematic simulation of the velocity field of the air flow in the longitudinal-vertical plane of the pneumatic separating channel is made on the basis of measuring their actual magnitude and direction at the nominal grain load. Calculation and construction of particle trajectories is performed with regard to their ricochet from the channel walls. The improved method includes three stages. At the first stage, the vector field of airflow velocity in equal rectangular centers located in the separation area throughout the height and depth of the pneumatic separating channel are determined experimentally. At the second stage, on the basis of particular values of velocity vectors in the rectangular centers the systems of math equations are made. They describe the vertical and horizontal components of these velocities in the corresponding sectors of coordinate axes. At the third stage, the system of differential equations of particle motion in a pneumatic separating channel relative to a Cartesian coordinate system is made and their

Вып. 14. С. 148-153.

6. Сычугов Ю.В. Модернизация объектов послеуборочной обработки зерна. Киров: ФГБОУ ВО Вятская ГСХА, 2015. С. 71-81.

7. Лазыкин В.А. Применение экспериментально-теоретического метода для расчёта траекторий движения частиц в вертикальном пневмосепарирующем канале // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: сб. науч. тр. Киров: ФГБОУ ВО Вятская ГСХА, 2016. Вып. 17. С. 147-150.

8. 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 Межд. научн.-практ. конф. в рамках 17-ой Международной агропромышленной выставки «Интерагромаш-2014», 25-27 февраля. Ростов н/Д, 2014. С. 52-54.

9. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б. Solid Works 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ – Петербург, 2008. 1040 с.

10. Алямовский А.А. Инженерные расчёты в Solid Works Simulation. М.: ДМК Пресс, 2010. 464 с.

11. Галанин М.П., Савенков Е.Б. Методы численного анализа математических моделей. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 591 с.

12. Бутовченко А.В., Дорошенко А.А. Моделирование процесса движения компонентов зернового материала в неравномерном воздушном потоке с использованием программного пакета MAPPLE // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: материалы 7-ой Междун. научн.-практ. конф. в рамках 17-ой Международной агропромышленной выставки «Интерагромаш-2014»,

trajectories are calculated. This improved method raises the accuracy of calculation the particle trajectory inside the pneumatic separating channel and aerodynamic parameters of particles when leaving it. It results in speeding up the process of optimization of the design parameters of the channel and the attached elements of the pneumatic system.

**Key words:** *air flow, grain components separation, mathematic simulation*

### References

1. Gortinskiy V.V., Demskiy A.B., Boriskin M.A. *Protsessy separirovaniya na zernopererabatyvayushchikh predpriyatiyakh*. [Processes of separation in the grain processing companies]. Moscow: Kolos, 1980. pp.161-181.
2. Nelyubov A.I., Vetrov V.F. *Pnevmostepariruyushchie sistemy sel'skokhozyaystvennykh mashin*. [Pneumatic separating systems of agricultural machinery]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1977. 192 p.
3. Burkov A.I., Glushkov A.L. *Analiz traektoriy dvizheniya komponentov zernovogo vorokha v naklonnom pnevmostepariruyushchem kanale*. [Analysis of the movement trajectories of the grain heap components in an inclined pneumatic separating channel]. *Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazateley sel'skokhozyaystvennoy energetiki: Sb. nauch. tr.* [Improvement of operational indicators of agricultural energy: collection of proceedings]. Kirov: FGBOU VO Vyatskaya GSKhA, 2005. Vyp. 5. S. 102-108.
4. Sysuev V.A., Aleshkin A.V., Kormshchikov A.D. *Metody mekhaniki v sel'skokhozyaystvennoy tekhnike*. [Methods of mechanics in agricultural machinery]. Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 1997. pp. 7-23.
5. Saitov V.E., Suvorov A.N., Farafonov V.G. *Matematicheskaya model' dvizheniya chastitsy v pryamolinейnom pnevmostepariruyushchem kanale s uchetyom neravnomernosti struktury vozdušnogo potoka*. [Mathematical model of particle motion in a straight pneumatic separating channel taking into account the unevenness of the air flow structure]. *Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazateley sel'skokhozyaystvennoy energetiki: materialy VI Mezhdunarod. nauchn.-prakt. konf "Nauka-Tekhnologiya-Resursosberezhenie"*. [Improvement of operational indicators of agricultural energy: Materials of the VII International scientific and practical Conference «Science-Technology-Resource saving»]. Kirov: FGBOU VO Vyatskaya GSKhA, 2013. Iss. 14. pp. 148-153.
6. Sychugov Yu.V. *Modernizatsiya ob'ektov posleuborochnoy obrabotki zerna*. [Modernization of objects of post-harvest grain processing: Monograph]. Kirov: FGBOU VO Vyatskaya GSKhA, 2015. pp. 71-81.
7. Lazykin V.A. *Primenenie eksperimental'no-teoreticheskogo metoda dlya rascheta traektoriy dvizheniya chastits v vertikal'nom pnevmostepariruyushchem kanale*. [Application of the experimental-theoretical method for calculating the trajectories of particles in the vertical pneumatic separating channel]. *Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazateley sel'skokhozyaystvennoy energetiki: sb. nauch. tr.* [Improvement of operational indicators of agricultural energy: collection of proceedings]. Kirov: FGBOU VO Vyatskaya GSKhA, 2016. Iss. 17. pp. 147-150.
8. Butovchenko A.V., Doroshenko A.A., Savchenko A.A., Shubin A.I. *Ispol'zovanie programmnoy kompleksa "FLOWVISION" dlya opredeleniya kharakteristik vozdušnogo potoka v pnevmokanale*. [Use of the software complex "FLOWVISION" to determine the characteristics of the air flow in the pneumatic channel]. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennoy mashinostroyeniya: Materialy 7-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii v ramkakh 17-oy Mezhdunarodnoy agropromyshlennoy vystavki "Interagromash-2014"*. [The state and prospects of development of agricultural mechanical engineering: Materials of the 7-th International scientific and practical Conference in the framework of the 17th International agricultural exhibition "Interagromash-2014"]. 25-27 fev. Rostov-na-Donu, 2014. pp. 52-54.
9. Alyamovskiy A.A., Sobachkin A.A., Odintsov E.V., Kharitonovich A.I., Ponomarev N. B. *Solid Works 2007/2008. Komp'yuternoe modelirovaniye v inzhenernoy praktike*. [Solid Works 2007/2008. Computer modeling in engineering practice]. Sankt-Peterburg: BKhV – Peterburg, 2008. 1040 p.
10. Alyamovskiy A.A. *Inzhenernye raschety v Solid Works Simulation*. [Engineering calculations in Solid Works Simulation]. Moscow: DMK Press, 2010. 464 p.
11. Galanin M.P., Savenkov E.B. *Metody chislennogo analiza matematicheskikh modeley*. [Methods of numerical analysis of mathematical models]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana, 2010. 591 p.
12. Butovchenko A.V., Doroshenko A.A. *Modelirovaniye protsessa dvizheniya komponentov zernovogo materiala v neravnomernom vozdušnom potoke s ispol'zovaniem programmnoy paketa MAPPLE*. [Modeling of process of movement of the components of the grain material in uneven air flow using the software package MAPPLE]. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennoy mashinostroyeniya: Materialy 7-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii v ramkakh 17-oy Mezhdunarodnoy agropromyshlennoy vystavki "Interagromash-2014"*. [The state and prospects of development of agricultural mechanical engineering: Materials of the 7-th International scientific and practical Conference in the framework of the 17th International agricultural exhibition "Interagromash-2014"]. 25-27 fev. Rostov-na-Donu, 2014. pp. 60-63.

### Information about the authors:

A.I. Burkov, DSc in Engineering, professor, chief scientific officer, e-mail: burkov.46@mail.ru,  
A.L. Glushkov, PhD in Engineering, senior researcher,  
V.A. Lazykin, PhD in Engineering, junior researcher

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