

УДК 631.362.001.573

Моделирование процесса сепарации зернового вороха в вертикальном пневмоканале

Ю. И. Ермольев, А. В. Бутовченко, А. А. Дорошенко

(Донской государственный технический университет),

С. В. Белов

(ООО «Донская гофротара»)

Приведена методология и показатели процесса пневмосепарации зернового вороха в вертикальном пневмоканале при заданных вероятностных характеристиках воздушного потока, подачи зернового вороха в пневмосепаратор и плотностей вероятностей скоростей витания всех компонентов вороха.

Ключевые слова: процесс, математическая модель, показатели сепарации, результаты моделирования.

Введение. В настоящее время актуальным является вопрос, связанный с повышением качества и снижения затрат на послеуборочную обработку семян, которые составляют до 40 % общих затрат на его производство. При послеуборочной обработке очень важно выделить мелкие засорители, травмированные и биологически неполноценные зёрна, которые являются благоприятной средой для развития микроорганизмов, ухудшающих качество исходного зернового материала.

Для выполнения всех этих требований используются сложные зерно- и семяочистительные машины, имеющие пневмосепарирующие рабочие органы. Но данные рабочие органы неспособны выделить более 30 % всех засорителей зернового материала. Проблемой является неравномерность ввода зернового материала и распределения воздушного потока по ширине канала.

Моделирование процесса сепарации зернового вороха. Существующие математические модели упрощённо описывают процесс функционирования сепараторов без учёта вероятностных характеристик распределений скоростей витания всех компонентов, входящих в состав зернового материала, а также плотности распределения вероятности воздушного потока и вероятностных характеристик поступления зернового материала по ширине пневмоканала. В качестве исходного материала взят зерновой ворох из бункера зерноуборочного комбайна в Ростовской области. Состав вороха представлен в табл. 1.

Таблица 1

Фракционный состав зернового вороха

№	Содержание j -го компонента, безразмерная	Наименование j -го компонента
1	0,8729	Зерно пшеницы
2	0,06	Щуплое зерно
3	0,008	Минеральные примеси
4	0,0001	Полова
5	0,005	Соломистые примеси
6	0,045	Крупные примеси
7	0,001	Дроблёное зерно
8	0,008	Семена сорняков

Нами выбраны репрезентативные выборки этих компонентов и по известным методикам оценены вероятностные характеристики скоростей витания компонентов, входящих в состав зернового вороха. Плотности вероятности скоростей витания компонентов зерносоромистого вороха, используемые в данной работе, представлены на рис. 1.

В качестве объекта исследования принят процесс сепарации зерносоромистого вороха в вертикальный пневмоканале с нагнетательным воздушным потоком (рис. 2, 3).

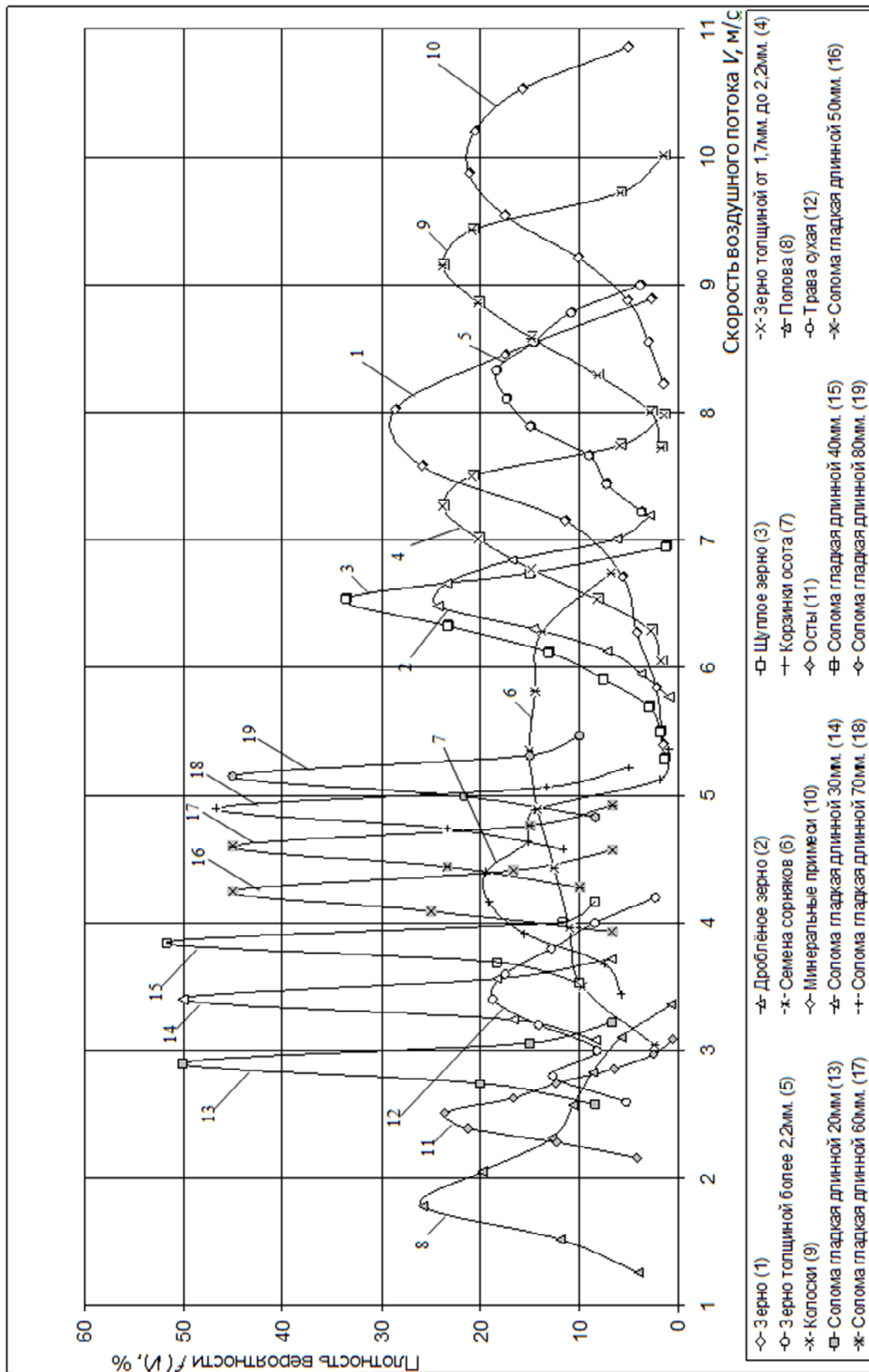


Рис. 1. Плотности вероятности скоростей витания компонентов зернового вороха



Рис. 2. Лабораторная установка

Функция цели:

Полнота выделения j -го компонента из исходного зернового вороха:

$$\epsilon_{\Sigma \Pi_j} \rightarrow \max \text{ при } j = 2, 3, \dots, b, \quad (1)$$

Ограничения: полнота выделения в лёгкую фракцию зерна толщиной более 1,7 мм:

$$\epsilon_{\Sigma \Pi(\text{зерно})} \leq 0,5\%; \quad (2)$$

интервал поиска оптимальной скорости воздушного потока для выполнения ограничения находится в диапазоне:

$$4 \leq V_b \leq 8 \text{ м/с}; \quad (3)$$

шаг поиска скорости воздушного потока:

$$t_{V_k} = 0,01 \text{ м/с}.$$

Для учёта вероятностных характеристик $f_i(B)$, $f_Q(B)$ условно разделим пневмоканал по ширине B на равные участки ($P = 1, 2, \dots, e$), $e = 11$ (см. рис. 3).

Для этих условий оценивается сепарация зернового вороха на каждом p -м участке при соответствующей на нём V_p скорости воздушного потока, подачи Q_p на него зернового вороха с известными вероятностными характеристиками $f(V)_j$ его j -х компонентов постоянными для каждого P -го участка.

На первом этапе исследований использовался вертикальный пневмоканал с параметрами $B = 1 \text{ м}$, $S = 0,2 \text{ м}$, с нагнетательным воздушным потоком, формируемым центробежным вентилятором [3] с известной плотностью вероятностью $f_i(B)$ скоростей воздушного потока (рис. 4).

Плотность вероятности $f_Q(B)$ принята в идее нормального закона распределения

$$f_Q(B) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Q} \int_0^B e^{-\frac{(Q-m_Q)^2}{2\sigma_Q^2}} dB, \quad (4)$$

где $m_a = 10 \text{ кг/м} \cdot \text{с}$, $\sigma_Q^2 = 8,096 [\text{кг/м} \cdot \text{с}]^2$.

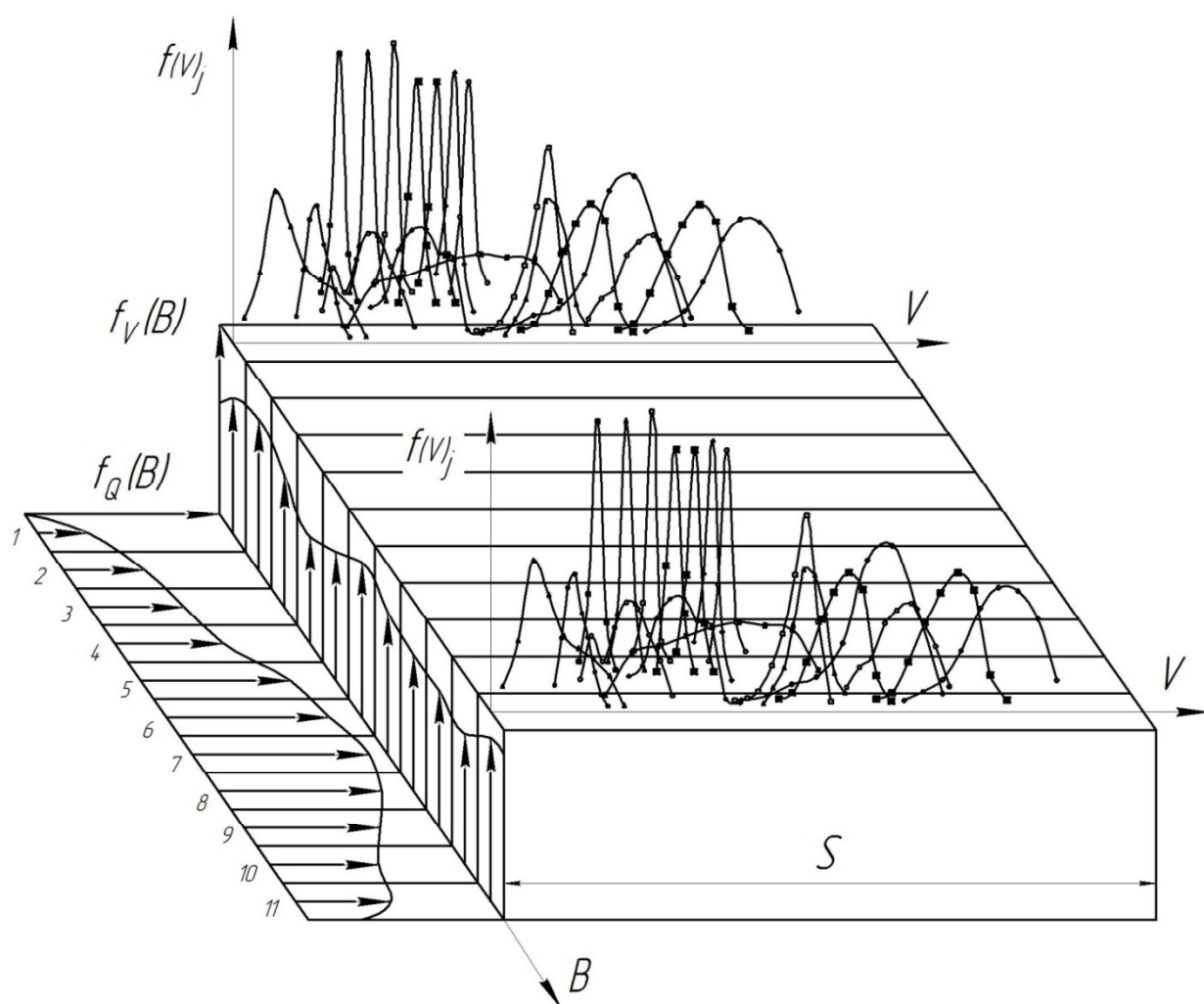


Рис. 3. Вероятностные характеристики распределения воздушного потока $f_V(B)$; подачи зернового вороха $f_Q(B)$ по ширине B пневмоканала и плотности вероятностей $f(V_j)$; распределения скоростей витания компонентов зернового вороха на участках 1, 2, ..., n ширины пневмоканала

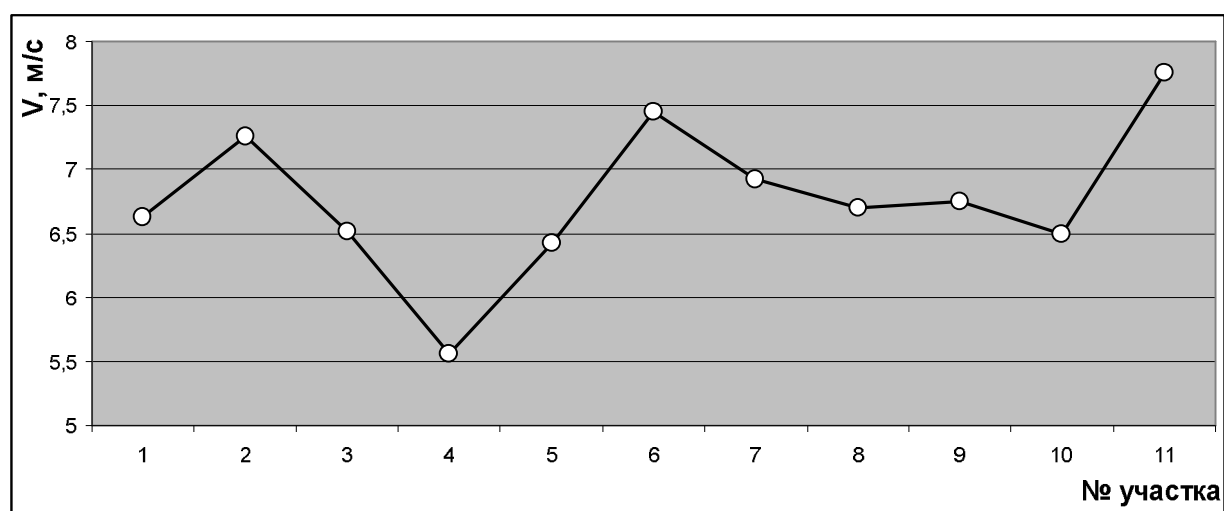


Рис. 4. Плотность вероятностей $f_V(B)$ скоростей воздушного потока

Плотности вероятностей $f(B)_j$ скоростей витания j -х компонентов постоянны на каждом p -м участке и соответствуют найденным $f(V)_j$ (см. рис. 1) компонентам исходного измельчённого соломистого вороха.

Известно [1, 2], что при заданных вероятностных характеристиках процесса сепарации зерносоломистого вороха по ширине пневмоканала математическое ожидание полноты прохода j -го компонента в очищенные фракции зернового вороха определяется выражением (5).

$$\varepsilon_{\Sigma \Pi_j} = \frac{\sum_{p=1}^e Q_p \cdot \varepsilon_{\Pi_p} \cdot (Q_p, V_p, f_{vj})}{Q_0 \cdot e}, \quad (5)$$

где Q_p — подача зернового вороха на p -й участок ширины B пневмоканала;

$$Q_p = \frac{B \cdot Q_0}{K} \cdot \frac{\int_{p-1}^p f_Q(B) dB}{\int_{p=1}^e f_Q(B) dB}; \quad (6)$$

V_p — средняя скорость воздушного потока на p -м участке ширины пневмоканала;

$$V_p = \frac{B \cdot V}{K} \cdot \frac{\int_{p-1}^p f_V(B) dB}{\int_{p=1}^e f_V(B) dB}; \quad (7)$$

$$K = \frac{B}{e}. \quad (8)$$

Для оценки показателей функционирования вертикального пневмоканала приняты следующие выражения.

Полнота выделения (унос) j -го компонента в лёгкие фракции.

$$\varepsilon_{b_j} = (1 - \varepsilon_{\Sigma \Pi_j}); \quad (9)$$

содержание j -го компонента в очищенном зерне.

$$b_j = a_j \cdot \varepsilon_{\Sigma \Pi_j} / \sum_{j=1}^B a_j \cdot \varepsilon_{\Sigma \Pi_j}; \quad (10)$$

Содержание j -го компонента в лёгких фракциях.

$$b_{ja} = a_j \cdot (1 - \varepsilon_{\Sigma \Pi_j}) / \left\{ \sum_{j=1}^B [a_j \cdot (1 - \varepsilon_{\Sigma \Pi_j})] \right\}; \quad (11)$$

Содержание зерновых $B_{п.зерн}$ и сорных $B_{п.сорн.}$ примесей в очищенном зерне.

$$B_{п.сорн.} = \frac{\sum_{сорные} b_j}{\sum_{j=1}^e b_j}; \quad (12)$$

$$B_{п.зерн} = \frac{\sum_{зерновые} b_j}{\sum_{j=1}^e b_j}; \quad (13)$$

Разработана математическая модель процесса сепарации зернового вороха в вертикальном пневмоканале с учётом указанных вероятностных характеристик компонентов зерносоломистого вороха и плотностей вероятностей распределения воздушного потока и подачи вороха по ширине B

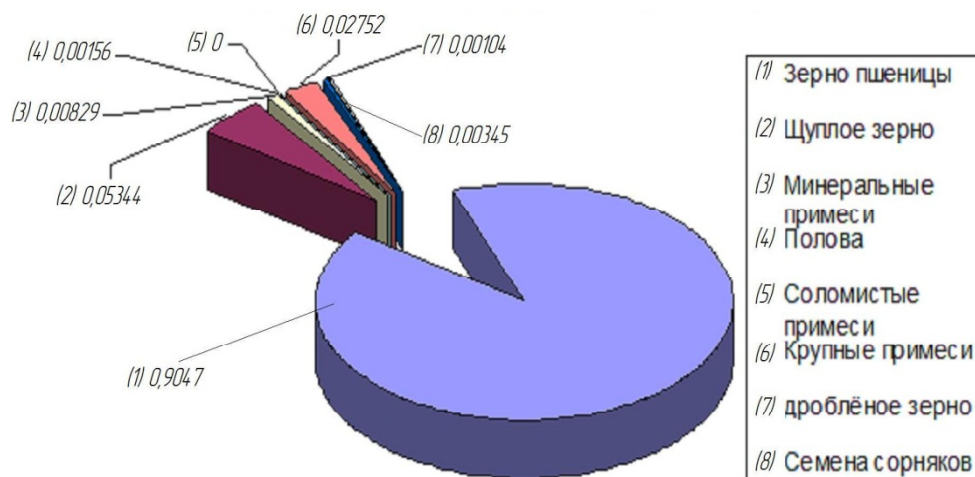
пневмоканала. Плотности вероятностей $f(V)$, скоростей витания j -х компонентов, представленных на рисунке 1, описаны полиномом четвёртой степени и представлены в таблице 2.

Таблица 2

Уравнения регрессии, описывающие плотности вероятностей скоростей витания компонентов зернового вороха $f(V) = C_1 \cdot V^4 + C_2 \cdot V^3 + C_3 \cdot V^2 + C_4 \cdot V + C_0$.

№	Компоненты зерносоромистого вороха	Скорости витания		Коэффициенты при переменных				
		$V_{\min}$	$V_{\max}$	C_1	C_2	C_3	C_4	C_0
1	Щуплое зерно	5,18	7,052	-0,0613	0,6892	-1,0939	-1,844	4,3889
2	Дроблёное зерно	5,68	7,273	0,1094	-2,357	15,902	-34,215	22,556
3	Корзинки осота	3,32	5,48	0,0657	-1,2994	7,5321	-11,603	11,028
4	Колоски	7,57	10,144	0,0721	-1,6725	11,868	-25,888	18,194
5	Минеральные примеси	8,05	11,02	0,0029	-0,3504	3,9323	-9,4644	7,7778
6	Полова	1,12	3,487	-0,0568	1,3939	-12,311	42,655	-29,167
7	Зерно толщиной более 2,2 мм	7,1	9,107	0,0248	-0,5997	4,0389	-6,0867	3,3889
8	Семена сорняков	2,8	6,967	-0,0412	0,7939	-5,6101	18,221	-10,722
9	Зерно толщиной от 1,7 мм до 2,2 мм	5,92	8,098	0,0248	-0,5997	4,0389	-6,0867	6,3889
10	Сухая трава	2,5	4,3	0,0165	-0,4223	2,8339	-3,9774	8,2222
11	Осты	2,1	3,1444	0,0721	-1,6725	11,868	-25,888	18,194
12	Солома длиной 20 мм	2,5	3,3	7,2938	-86,831	347,81	-533,35	273,41
13	Солома длиной 30 мм	3	3,8	7,2979	-87,993	358,02	-559,26	290,26
14	Солома длиной 40 мм	3,45	4,25	8,6854	-103,25	414,89	-646,85	333,53
15	Солома длиной 50 мм	3,85	4,65	4,8667	-57,01	221,23	-319,29	156,86
16	Солома длиной 60 мм	4,2	5	5,5583	-65,59	258,76	-387,19	198,46
17	Солома длиной 70 мм	4,5	5,3001	6,2542	-73,938	293,12	-443,92	230,15
18	Солома длиной 80 мм	4,75	5,55	5,9063	-69,626	275,11	-413,21	210,15

Формы кривых вероятностных характеристик $f_i(B)$ и $f_q(B)$ приняты в соответствии с экспериментальными результатами исследования нагнетательных воздушных потоков в вертикальном пневмоканале и подачи зернового вороха в пневмоканал современных воздушно-решётных зерноочистительных машин.

Рис. 5. Содержание j -го компонента в очищенном зерне

Рабочая ширина пневмоканала разбита на 11 равных участков, при использовании методов нелинейного программирования — метода сканирования с ограничениями, определены допустимые вероятностные характеристики воздушного потока в пневмоканале по его ширине, обеспечивающие выполнение функции цели и ограничения (1) — (3).

Рациональные скорости воздушного потока в соответствии с заданной плотностью вероятности $f_i(B)$ и вероятности подачи зернового вороха P_{Qp} на каждом p -м участке ширины пневмоканала приведены в таблице 3.

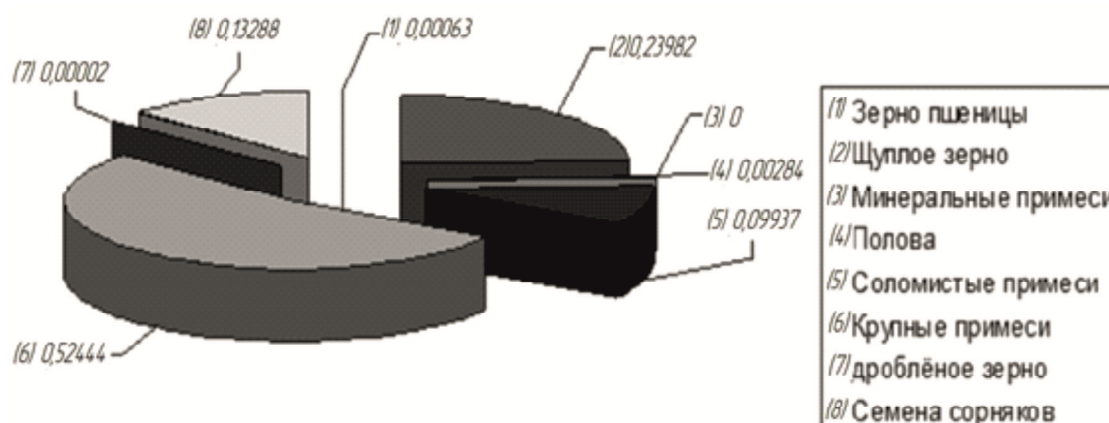


Рис. 6. Содержание j -го компонента в лёгкой фракции

Таблица 3

Рациональные скорости V_p и вероятности подачи P_{QR} зернового вороха участках ширины B пневмоканала

Характеристика	№ участка										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Скорость воздушного потока V_p , м/с	5,23	5,86	5,12	4,16	5,02	6,05	5,52	5,3	5,35	5,60	6,36
Вероятность подачи зернового вороха P_{QR} , %	0,06	0,06	0,07	0,08	0,11	0,12	0,13	0,12	0,1	0,08	0,07

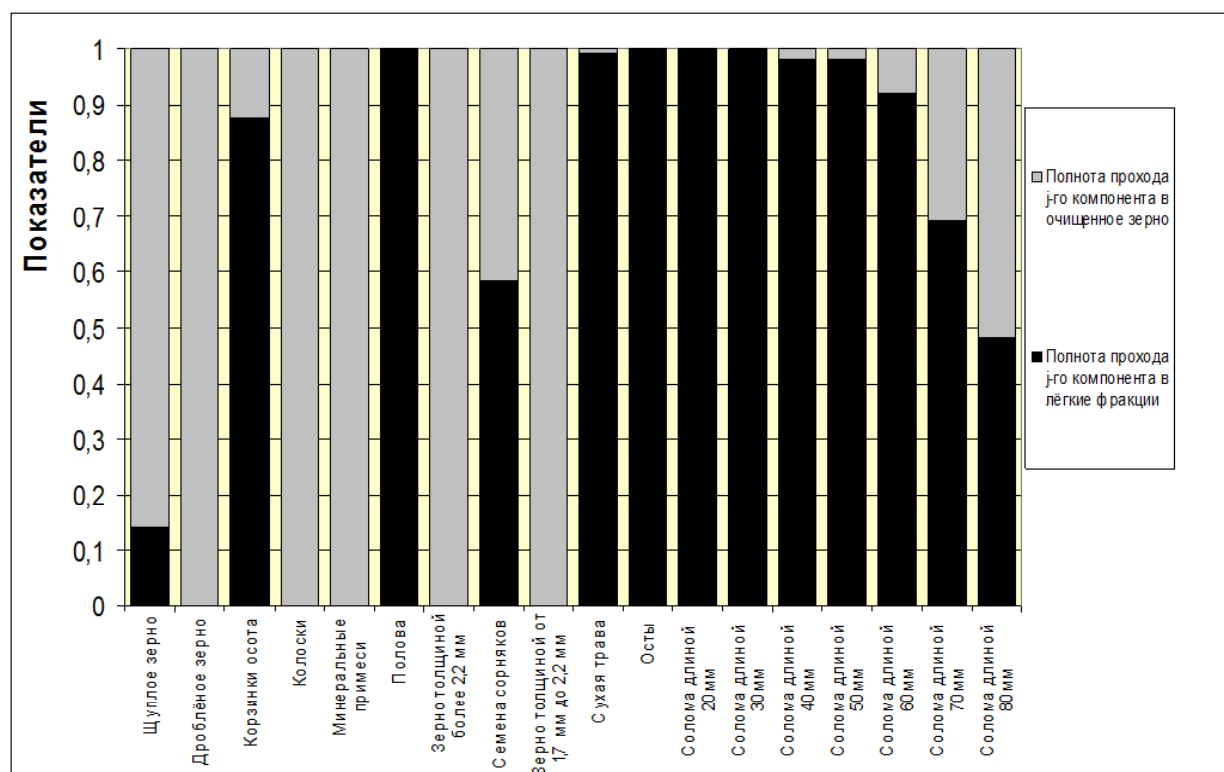


Рис. 7. Распределение полноты прохода компонентов зернового вороха в лёгкие фракции и в очищенное зерно

Разработана программа для ЭВМ для многомерного анализа рассматриваемого процесса функционирования пневмоканала.

Моделирование проведено при следующих допущениях: пневмосепарация зернового вороха рассматривалась без учёта влияния компонентов вороха друг на друга при перемещении в

пневмоканале; вероятностные характеристики воздушного потока в пневмоканале не изменяли свою структуру $f_i(B)$ при сепарации.

Результаты моделирования представлены на рисунках 5—8 и в табл. 4.

Таблица 4

Распределение полноты прохода компонентов зернового вороха в лёгкие фракции и в очищенное зерно

№	Компонент зернового вороха	Полнота прохода j -го компонента в лёгкие фракции	Полнота прохода j -го компонента в очищенное зерно
1	Щуплое зерно	0,1406	0,8594
2	Дроблёное зерно	0,00074	0,99926
3	Корзинки осота	0,8752	0,1248
4	Колоски	0	1
5	Минеральные примеси	0	1
6	Полова	1	0
7	Зерно толщиной более 2,2 мм	0	1
8	Семена сорняков	0,5842	0,4158
9	Зерно толщиной от 1,7 мм до 2,2 мм	0,00025	0,99975
10	Сухая трава	0,9926	0,0074
11	Осты	1	0
12	Солома длиной 20 мм	1	0
13	Солома длиной 30 мм	1	0
14	Солома длиной 40 мм	0,9809	0,0191
15	Солома длиной 50 мм	0,9807	0,0193
18	Солома длиной 60 мм	0,92	0,08
20	Солома длиной 70 мм	0,6927	0,3073
21	Солома длиной 80 мм	0,4827	0,5173

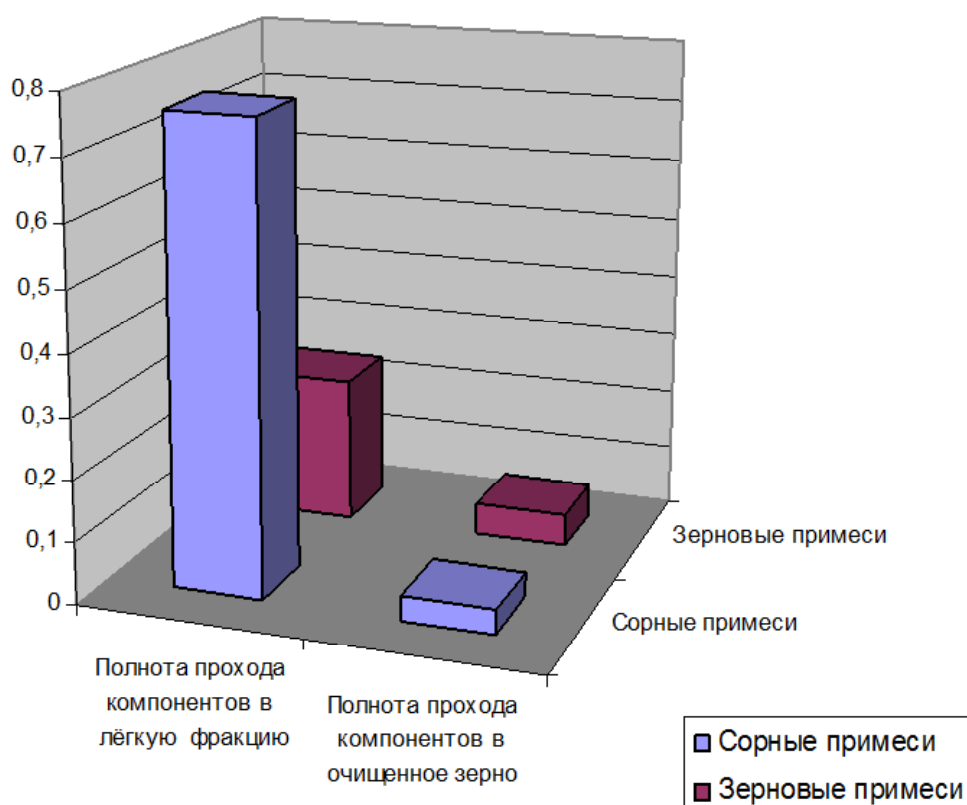


Рис. 8. Суммарное распределение полноты прохода компонентов в лёгкие фракции и в очищенное зерно

Выводы. Анализ полученных результатов показывает, что в ходе работы:

1) установлено, что при заданных вероятностных характеристиках скоростей витания компонентов зернового вороха, подачи и скоростей воздушного потока в вертикальном пневмоканале процесс сепарации зернового вороха высок и обеспечивает его качественную сепарацию в вертикальном пневмоканале.

2) разработаны методология и математическая модель процесса пневмосепарации зернового вороха с заданными вероятностными характеристиками:

- плотности скоростей витания всех компонентов вороха,
- распределения скоростей воздушного потока и
- подачи зернового вороха по ширине пневмоканала.

Библиографический список

1. Ермольев, Ю. И. Энергосберегающие технологии сепарации зерновых отходов на предприятиях приёма, переработки и хранения зерна / Ю. И. Ермольев, Г. И. Лукинов. — Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2007. — 234 с.

2. Ермольев, Ю. И. Проектирование технологических процессов и воздушно-решётных и решётных зерноочистительных машин / Ю. И. Ермольев [и др.]. — Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2010. — 638 с.

Материал поступил в редакцию 16.06.2012.

References

1. Yermolyev, Y.I., Lukinov, G.I. *Energoberegayushchiye tekhnologii separatsii zernovykh otkhodov na predpriyatiyakh priyema, pererabotki i khraneniya zerna*. [Energy-efficient technologies of screening separation at grain receiving, processing, and storage farm units.] Rostov-on-Don, DSTU Publ. Centre, 2007, 234 p. (in Russian).

2. Yermolyev, Y.I., Butovchenko, A.V., Moskovskiy, M.N., Shelkov, M.V. *Proektirovaniye tekhnologicheskikh protsessov i vozdushno-reshetnykh i reshetnykh zernoochistitelnykh mashin*. [Technological process design of air-and-screen and screen cleaners.] Rostov-on-Don, DSTU Publ. Centre, 2010, 638 p. (in Russian).

SIMULATION OF GRAIN PILE SEPARATION IN VERTICAL PNEUMATIC PASSAGE

Y. I. Yermolyev, A. V. Butovchenko, A. A. Doroshenko

(Don State Technical University),

S. V. Belov

(«Donskaya Gofrotara» LLC)

The methodology and grain pile pneumatic separation parameters in the vertical pneumatic passage under the specified probabilistic characteristics of the airflow, the grain pile feed into the pneumatic separator, and the terminal velocity probability density of all pile components are described.

Keywords: process, mathematical model, separation parameters, simulation results.