

Распределение высокозагрязненного соевого материала в глубоком воздушном канале

Максим Николаевич Московский,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: maxmoskovsky74@yandex.ru;

Сергей Игоревич Борзенко,
младший научный сотрудник,
e-mail: serzhbk@gmail.com

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отмечено отсутствие машин и оборудования, способных качественно и с высокой производительностью очищать высокозагрязненный материал сои. Большинство применяемых зерноочистительных машин создавались для переработки материала, отвечающего нормам ГОСТ 17109-88 по содержанию сорной и масляной примеси соответственно 2 и 6 процентов. Фактически типовой состав отходов послеуборочной обработки сои может содержать от 20 до 60 процентов отходов, непригодных для извлечения сырого протеина, что делает данный материал полностью неразделимым. (*Цель исследования*) Определение оптимальной эффективности сепарирования гетерогенных сыпучих смесей в вертикально восходящем воздушном канале. (*Материалы и методы*) Использовались ротационный порционный классификатор РПК 30 и макетный образец прецизионного воздушного классификатора ПВК с колонковыми акселераторами воздушного потока. Определены зависимость полноты выделения примеси и эффективность процесса сепарации соевого отхода в пневмоклассификаторе нового типа от толщины акселераторов и высоты над обрабатываемым материалом. (*Результаты и обсуждение*) Установлено, что эффективность процесса сепарации высокозасоренного соевого материала в стандартном пневмоканале не превышала 20 процентов, а на прецизионном воздушном классификаторе степень разделения составила около 45 процентов. (*Выводы*) Типовые машины, в которых используется воздушный поток, не справляются с сильно засоренным материалом. Выравнивание скорости воздушного потока внутри слоя обрабатываемого материала и над ним при установке колонковых акселераторов воздушного потока способствует лучшей сепарации высокозагрязненного материала. Исследование указывает на то, что обрабатываемый материал может быть разделен воздушным потоком, но при условии использования специализированного пневмосепарирующего канала. За счет соотношения высоты колонковых акселераторов и высоты над материалом скорость воздушного потока внутри разделяемого слоя и над ним выравнивается.

Ключевые слова: соя, отходы, эффективность сепарирования, очистка, пневматический канал.

■ **Для цитирования:** Московский М.Н., Борзенко С.И. Распределение высокозагрязненного соевого материала в глубоком воздушном канале // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №4. С. 42-48. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-42-48. EDN: BCAUPY.

Distribution of Heterogeneous, Highly Impure Soy Material in a Deep Air Channel

Maksim N. Moskovskiy,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: maxmoskovsky74@yandex.ru;

Sergey I. Borzenko,
junior researcher,
e-mail: serzhbk@gmail.com

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper highlights a lack of machines and equipment capable of cleaning highly impure soybean material efficiently and productively. Most of the existing grain cleaning machines are designed for the materials conforming to GOST 17109-88 that specifies weed and oilseed impurity contents of 2 and 6 percent, respectively. In reality, a typical soybean post-harvest waste often contains 20 to 60 percent of material unsuitable for extracting raw protein, that makes this type of material completely non-separable for this type of machine. (*Research purpose*) The research aims to determine the optimal efficiency of separating heterogeneous bulk mixtures in a vertically ascending air channel. (*Materials and methods*) To accomplish this, the authors employed a rotary batch classifier RBK 30 and a prototype sample of a precision air classifier PAC with column air flow accelerators. The paper defines impurity separation completeness and soybean waste separation efficiency in a novel pneumatic classifier, considering the accelerator thickness and the height above the processed material. (*Results and discussion*) The findings reveal that traditional

pneumatic channels achieve no more than 20 percent of separation efficiency for highly impure soybean material, while the precision air classifier demonstrates approximately a 45 percent separation. (*Conclusions*) Typical air flow machines struggle with high impurity of material. The separation efficiency of highly impure material can be enhanced by equalizing the air flow velocity inside and above the layer of the separated material and installing a core air flow accelerator. The study indicates that the material being processed can be separated by air flow, provided a specialized pneumatic separation channel is used. Due to the ratio of the core accelerator height and the height above the material, the air flow velocity inside and above the separated layer is equalized.

Keywords: soybean, waste, separation efficiency, cleaning, pneumatic channel.

For citation: Moskovskiy M.N., Borzenko S.I. Raspreделение vysokozagryaznennogo soevogo materiala v glubokom vozdušnom kanale [Distribution of heterogeneous, highly impure soy material in a deep air channel]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N4. 42-48 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-42-48. EDN: BCAUPY.

Соя относится к основным фуражным культурам как источник растительного белка для кормления сельскохозяйственных животных и птицы. Однако вследствие высокой рыночной цены сою количество добавляемого в корма сырого соевого протеина недостаточное [1]. Вместе с тем этот ценный компонент можно получить из отходов, образующихся при послеуборочной обработке сои [2]. Для этого битые и дробленые семена нужно отделить и очистить от примесей [3, 4].

Большинство зерноочистительных машин создавались для переработки материала заготавливаемой сои, соответствующего нормативам, принятым в ГОСТ 17109-88 «Соя. Требования при заготовках и поставках»: влажность 12-14%, содержание сорной примеси не выше 2%, масличной – 6% [5]. В действительности доля отходов, непригодных для извлечения сырого протеина, может составлять 20-60%, и их нельзя отделить на имеющихся очистительных машинах [6, 7].

Проблема заключается также в том, что мало изучены характеристики самого разделяемого материала [8]. Это – скорость витания, размерные параметры, прочие физико-механические характеристики, важные в процессах сепарации и калибровки [9, 10].

Цель исследования: определение оптимальной эффективности процесса сепарации для дифференцированных гетерогенных сыпучих смесей (отходов послеуборочной обработки сои) в вертикально восходящем воздушном канале.

На основе поставленной цели сформулированы задачи:

- определить типовой фракционный состав дифференцированных гетерогенных сыпучих смесей, как отходов послеуборочной обработки сои [11];
- изучить распределение смеси в типовом воздушном канале;
- провести исследования смеси в прецизионном воздушном канале с ускорителями воздушного потока.

Материалы и методы. Исследования проводились по методу В.Г. Ньютона и Г.В. Ньютона [12, 13].

Полноту выделения примеси вычисляли по формуле:

$$\varepsilon = \frac{M_{\Sigma \text{np}}}{M_{\text{O. np}}} \cdot 100, \% \quad (1)$$

где $M_{\Sigma \text{np}}$ – суммарная масса частиц примеси в осадочных камерах и пылеуловителях, г;

$M_{\text{O. np}}$ – общая масса примеси в исходном материале, г.

Потери частиц

$$\xi = \frac{M_{\Sigma \text{cm}}}{M_{\text{O. cm}}} \cdot 100, \% \quad (2)$$

где $M_{\Sigma \text{cm}}$ – суммарная масса частиц соевого материала в осадочных камерах и пылеуловителях, г;

$M_{\text{O. cm}}$ – общая масса соевого материала в исходном материале, г.

Эффективность процесса сепарации

$$E = \varepsilon - \xi \quad (3)$$

В исследовании использовались ротационный порционный классификатор (РПК-30); прецизионный воздушный классификатор с колонковыми акселераторами воздушного потока (ПВК); лабораторные весы *GF-600 «AND»* ($d = 0,001$ г), весы напольные «Гарант ВПН-500У» ($d = 0,01$ кг); пакет программы *MC-Excel*.

Исходный материал (*рис. 1*) влажностью 11,2% массой 30 кг получен после переработки сои на зерноочистительно-сортировальной машине «Леткус К-531 «Гигант». Это отход производства семян сои, содержащий сою целую – 9,71%, дробленную – 12,31, битую поперек – 4,21, битую вдоль – 55,39, жухлую и раздавленную – 5,29, примесь легкую (шелуха, полова, пыль) – 4,37, примесь минеральную – 6,61, семена других культур и неразвившуюся сою – 2,11%. По данному составу материала можно сделать вывод о том, что в отходах соевого производства содержится 81,62% высокобелкового соевого продукта. Соотнося исходный материал с приведенными показателями ГОСТ 17109-88, можно его характеризовать как сырье с высоким содержанием сорной примеси (Тиц З.Л., Анискин В.И., Баснакьян Г.А. Машины для послеуборочной поточной обработки семян. М.: Машиностроение, 1967. 447 с.; Патент RU 2377077 C1).

Результаты и обсуждения. Провели сравнение результатов эффективности процесса сепарации на установке, имитирующей стандартный пневмоканал (РПК-30), и новом канале с колонковыми акселераторами воздушного потока (ПВК) (*рис. 2*).

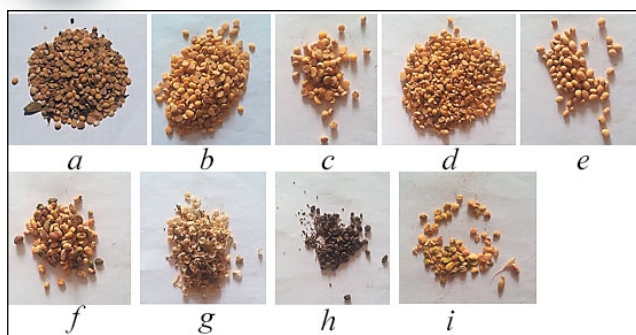


Рис. 1. Общий вид исходного материала и распределения его составных фракций: а – общий вид исходного материала; б – соя битая поперек; с – соя битая вдоль; д – дробленая (отколовшиеся кусочки); е – соя целая; ф – жухлая соя; г – легкая примесь; h – минеральная примесь; и – семена других культур
 Fig. 1. General view of the source material and the distribution of its constituent fractions: а – a general view of the source material; б – soy broken across; с – soy broken along; д – crushed (broken off pieces); е – whole soy; ф – withered soy; г – light impurity; h – mineral admixture; и – seeds of other crops

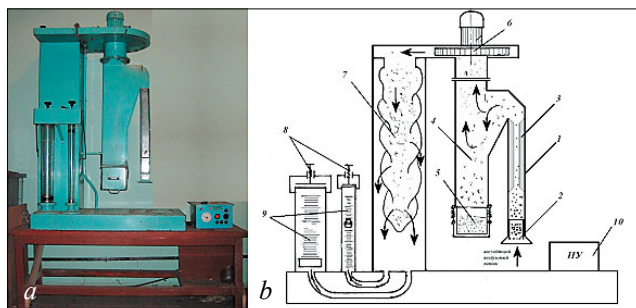


Рис. 2. Прецизионный воздушный классификатор с колонковыми акселераторами воздушного потока: а – общий вид; б – схема конструкции; 1 – пневмосепарирующий канал; 2 – загрузочная кассета с перфорированным дном; 3 – батарейный ускоритель воздушного потока; 4 – колонковый ускоритель воздушного потока; 5 – емкость сбора легкой фракции; 6 – вентилятор с электродвигателем; 7 – пылеуловители; 8 – устройство регулировки расхода воздуха; 9 – ротаметр; 10 – пульт управления
 Fig. 2. Precision Air Classifier with column air flow accelerators: а – general view; б – design diagram; 1 – pneumatic separation channel; 2 – loading cassette with perforated bottom; 3 – battery air flow accelerator; 4 – column air flow accelerator; 5 – container for receiving light fraction; 6 – fan with electric motor; 7 – dust collectors; 8 – device for adjusting air flow; 9 – rotameter; 10 – remote control

Эксперимент в обоих случаях проводился в трехкратной повторности. Загрузочная кассета наполнялась отдельно взятой одной из пяти фракцией материала: «целевой протеинсодержащий соевый продукт», «легкая примесь», «минеральная примесь», «жухлая соя» и «семена других культур». Кассета помещалась в аспирационную камеру, далее устанавливалась скорость воздушного потока в камере, и материал обрабатывался в течение 3 минут. Затем извле-

кали материал, улетевший в осадочную камеру, фиксировалась его масса и скорость воздушного потока, а опыт повторялся с повышением скорости воздушного потока до полного выноса материала из загрузочной кассеты.

По результатам исследований получены данные о распределении выхода фракций в зависимости от скорости воздушного потока (таблица) и построены интегральные кривые поля скоростей протеинсодержащего соевого продукта в диапазоне скорости витания 6-20 м/с. Сравнение его с прочими примесями позволяет оценить эффективность сепарации фракции «Целевой соевый продукт» и примесей.

По графикам частоты распределения минеральной примеси (рис. 3а) видно, что типовой воздушный канал без модернизаций способен с эффективностью 35,77% разделить данный вид материала, что позволяет классифицировать данную фракцию как трудноразделимую. После обработки на ПВК материал возможно сепарировать по аэродинамическим свойствам с эффективностью более 52%.

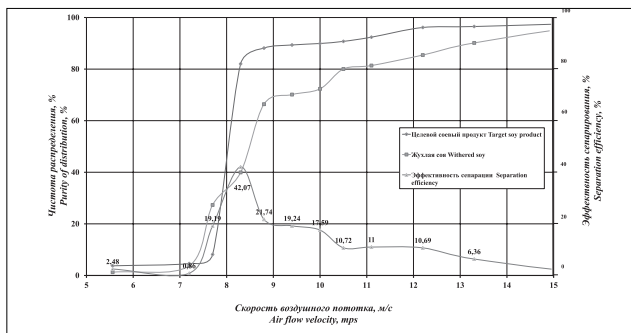
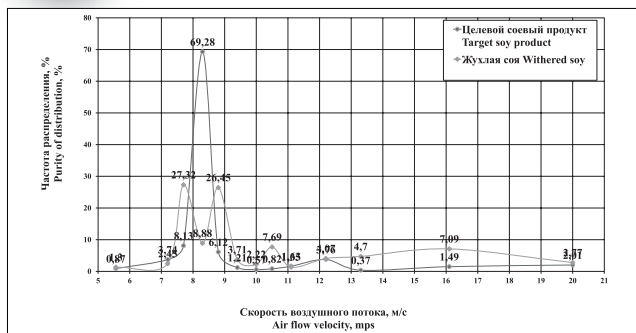
При разделении целевого соевого продукта и легкой примеси с использованием нового типа аспирационного канала эффективность процесса также увеличилась на 60% (рис. 3б). На 25% повысилась эффективность отделения фракции семян других культур (рис. 3с). И самую трудносепарируемую жухлую сою после обработки на ПВК с колонковыми акселераторами воздушного потока стало легче отделить: эффективность сепарации составила 42% по сравнению с 8% в стандартном канале (рис. 3д).

Для всех изученных вариантов смеси замечена закономерность повышения фракционирования при использовании колонковых акселераторов воздушного потока за счет выравнивания воздушного потока в аспирационной камере (Патент RU 2193929 С1).

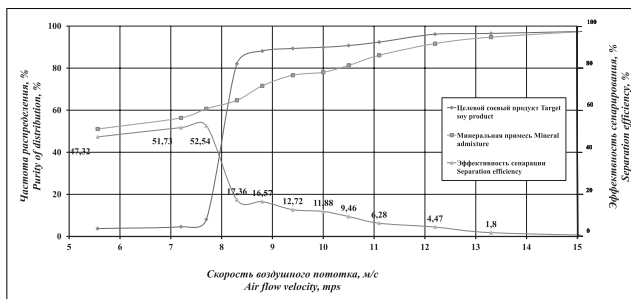
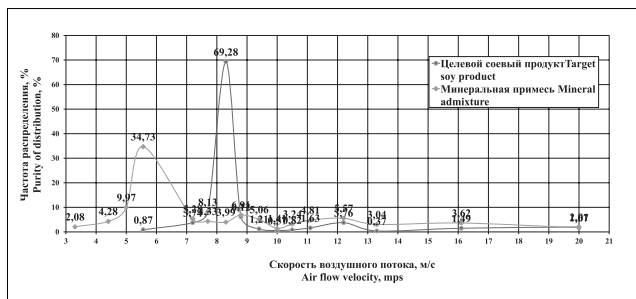
В сепарирующем пространстве (зазор между загрузочной кассетой и нижним основанием колонковых акселераторов воздушного потока) материал переходит в псевдооживленное и затем во взвешенное состояние.

В этом пространстве легкие частицы поднимаются вверх и их можно отделить, а более тяжелые (в том числе частицы сои) опускаются обратно в загрузочную кассету (перераспределяются). Данный эффект необходимо изучить в лабораторных или производственных условиях на типовых зерно-семячистительных машинах, либо разработать оригинальную схему процесса сепарации высокозагрязненного соевого продукта, если результат в серийных установках окажется неудовлетворительным. Для определения максимальной толщины колонковых акселераторов воздушного потока и высоты над сеткой требуется провести исследования непосредственно на зерно-семячистительной линии переработки высокозагрязненного соевого продукта [14].

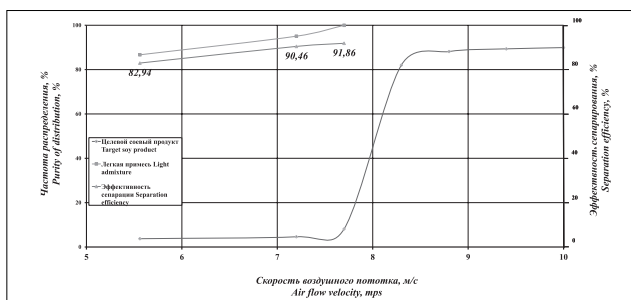
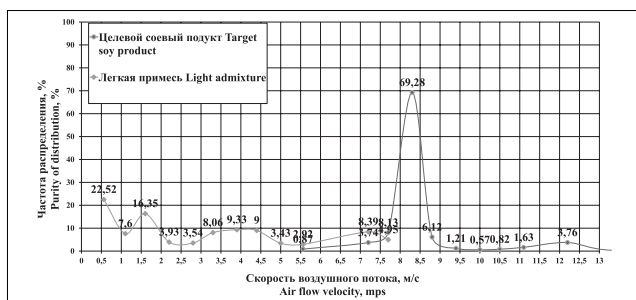
Интегральное распределение (ИР, %) и эффективность процесса сепарации (ЭС, %) материала в зависимости от скорости воздушного потока в РПК-30 и в ПВК Integral distribution (ID, %) and the material separation efficiency (SE, %) depending on the air flow velocity in Rotary Batch Classifier (RBC-30) and Precision Air Classifier (PAC)									
Скорость воздушного потока, м/с Air flow velocity, mps	Целевой соевый продукт Target soy product	Легкая примесь Light impurity		Минеральная примесь Mineral admixture		Семена других культур Seeds of other crops		Жухлая соя Withered soy	
	ИР / ID, %	ИР / ID, %	ЭС / SE, %	ИР / ID, %	ЭС / SE, %	ИР / ID, %	ЭС / SE, %	ИР / ID, %	ЭС / SE, %
<i>Ротационный порционный классификатор РПК-30 / Rotary batch classifier RBC-30</i>									
2,7	–	4,14	–	9,23	–	4,14	–	–	–
3,7	–	13,44	–	15,36	–	13,62	–	–	–
4,9	–	18,56	–	29,53	–	17,03	–	–	–
6	4,93	34,15	29,22	40,7	35,77	23,14	18,21	5,81	0,88
6,7	6,46	–	–	–	–	44	37,54	11,51	5,05
7,2	17,31	49,4	32,09	47,35	30,04	75,23	57,92	26,21	8,9
7,7	34,66	–	–	–	–	87,65	52,99	41,5	6,84
8,4	50,58	74,23	23,65	52,77	2,19	93,67	43,09	59,21	8,63
9	67,14	–	–	–	–	97,14	30	71,33	4,19
9,5	78,42	100	21,58	59,22	19,2	99,63	21,21	83,55	5,13
9,8	87,14	–	–	–	–	99,99	12,85	90,19	3,05
10,5	92,26	–	–	76,31	15,95	–	–	94,16	1,9
11	95,87	–	–	–	–	–	–	99,44	3,57
11,7	98,35	–	–	99,13	0,78	–	–	100,01	1,66
12,2	99,8	–	–	100	0,2	–	–	5,81	0,88
12,9	100,02	–	–	–	–	–	–	11,51	5,05
<i>Прецизионный воздушный классификатор ПВК / Precision Air Classifier PAC</i>									
0,56	–	7,6	–	–	–	–	–	–	–
1,1	–	30,1	–	–	–	–	–	–	–
1,6	–	46,4	–	–	–	–	–	–	–
2,2	–	50,4	–	–	–	–	–	–	–
2,8	–	53,94	–	–	–	–	–	–	–
3,3	–	62	–	4,28	–	5,17	–	–	–
3,9	–	71,33	–	6,36	–	7,83	–	–	–
4,4	–	80,33	–	16,33	–	14,15	–	–	–
5	–	83,76	–	51,06	–	21,85	–	–	–
5,56	3,74	86,68	82,94	56,34	47,32	81,85	18,11	1,26	2,48
7,2	4,61	95,07	90,46	60,67	51,73	1,62	77,24	3,75	0,86
7,7	8,13	100	91,98	64,66	52,54	87,66	6,51	27,32	19,19
8,3	82,02	–	–	71,57	17,36	90,95	5,64	39,95	42,07
8,8	88,14	–	–	76,63	16,57	94,11	2,81	66,4	21,74
9,4	89,35	–	–	78,04	12,72	97,14	4,76	70,11	19,24
10	89,92	–	–	81,28	11,88	98,31	7,22	72,33	17,59
10,5	90,74	–	–	86,09	9,46	100	7,57	80,02	10,72
11,1	92,37	–	–	91,66	6,28	–	–	81,37	11
12,2	96,13	–	–	94,7	4,47	–	–	85,44	10,69
13,3	96,5	–	–	98,32	1,8	–	–	90,14	6,36
16,1	97,99	–	–	99,99	0,33	–	–	97,23	0,76



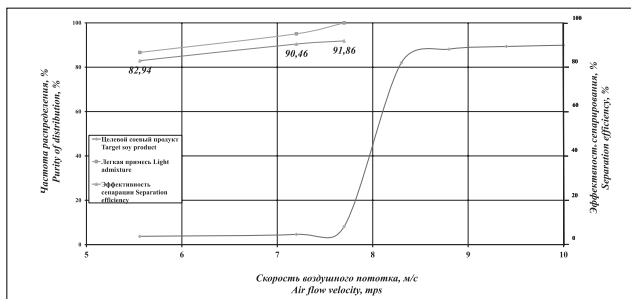
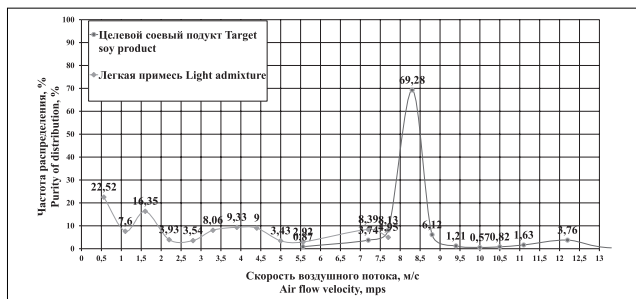
a. Целевой соевый материал и минеральная примесь / a. Target soy product and mineral admixture



b. Целевой соевый материал и легкая примесь / b. Target soy product and light admixture



c. Целевой соевый материал и примеси семян других культур / c. Target soy product and seeds of other crops



d. Целевой соевый материал и примесь (жухлая соя) / d. Target soy product and impurity (withered soy)

Рис. 3. Интегральные вариационные кривые поля скоростей воздушного потока и эффективность сепарирования целевого соевого материала и различных видов примеси (минеральная, легкая, семена других культур, жухлая соя) при обработке на РПК-30 (графики слева) и на ПВК (графики справа)

Fig. 3. Integral variational curves for air flow velocity field and separation efficiency of target soybean material from impurities (dried soybeans) in Rotary Batch Classifier RBC-30 (left) and Precision Air Classifier PAC (right)

Выводы. Анализ и сопоставление данных эксперимента позволяют сделать вывод о том, что при помощи стандартных пневмосепарирующих каналов весь протеинсодержащий продукт нельзя отделить от примесей, содержащихся в отходах сои. Ти-

повые машины с использованием воздушного потока не справляются с высокой засоренностью материала. Выравнивание скорости воздушного потока внутри слоя и над слоем обрабатываемого материала посредством установки колонковых аксе-

лераторов воздушного потока способствует лучшему разделению смеси.

Характер распределения поля скоростей по компонентам исходного материала указывает на возможность разделения обрабатываемого материала воздушным потоком, но при условии применения специализированного пневмо-сепарирующего канала с колонковыми акселераторами воздушного потока. За

счет соотношения высоты колонковых акселераторов и высоты над обрабатываемым материалом происходит выравнивание скорости воздушного потока внутри слоя материала и над ним. Эффективность выделения будет варьироваться от 40-45%.

В дальнейшем ставится задача по повышению эффективности разделения высокозагрязненного исходного материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., 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. 2-9. EDN: JXTJCH.
2. Зотиков В.И., Наумкина Т.С., Сидоренко В.С. Производство зернобобовых и крупяных культур в России: состояние, проблемы, перспективы // *Земледелие*. 2015. N4. С. 3-5. EDN: TZVJZF.
3. Panasiewicz M., Mazur J., Zawislak K., et al. The process of separation of husked soybean in oblique airflow. *Sustainability*. 2020. N12. 7566. DOI:10.3390/su12187566.
4. Хамуев В.Г., Московский М.Н., Борзенко С.И., Герасименко С.А. Исследование распределения скоростей воздушного потока в модели аспирационного канала для высокозасоренной соевой продукции // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2022. Т. 69. N2(47). С. 86-90. DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-2-86-90. EDN: EZXRPO.
5. Хамуев В.Г., Московский М.Н., Борзенко С.И. Лабораторные исследования опытного образца гравитационно-пневматического зерно-семяочистителя // *Инженерный вестник Дона*. 2018. N1(48). С. 89. EDN: XSMPQL.
6. Зюлин А.Н., Хамуев В.Г. Теоретическое исследование пневмосепарации зернового материала в вертикально восходящем потоке // *Техника в сельском хозяйстве*. 2008. N2. С. 3-6.
7. Московский М.Н., Хамуев В.Г., Герасименко С.А., Борзенко С.И. и др. Производственные испытания зерноочистительной машины с программно-аппаратным управлением в составе технологической линии // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68. N4 (45). С. 112-117. DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-4-112-117. EDN: LCMBQU.
8. Московский М.Н., Хамуев В.Г., Борзенко С.И. и др. Технологический аспект разделения семян кукурузы по индексу формы // *Естественные и технические науки*. 2019. N11(137). С. 182-184. EDN: SQKBZ.
9. 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. N4.
10. Kroulík M., Hůla J., Rybka A., Honzík I. Pneumatic conveying characteristics of seeds in a vertical ascending airstream. *Research in Agricultural Engineering*. 2016. 62. 56-63. DOI:10.17221/32/2014-RAE.
11. Łukaszuk J., Molenda M., Horabik J., et al. Airflow resistance of wheat bedding as influenced by the filling method. *Research in Agricultural Engineering*. 2008. 54. 50-57. DOI:10.17221/8/2008-RAE.
12. Burkov A., Glushkov A., Lazykin V., Mokiev V. Substantiation of the main design parameters of the separation chamber of the pneumatic separator using various methods for calculating particle trajectories in the pneumoseparating channel. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2022. 23. 402-410. DOI: 10.30766/2072-9081.2022.23.3.402-410.
13. Бадретдинов И.Д., Мударисов С.Г. Научное обоснование и совершенствование пневматических систем сельскохозяйственных машин на основе описания технологического процесса // *Вестник НГИЭИ*. 2019. N9 (100). С. 12.
14. Хамуев В.Г. Распределение скоростей воздушного потока в глубоком пневмосепарирующем канале // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. N4. С. 12-15..

REFERENCES

1. Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Zyulin A.N. Razrabotka i vnedrenie vysokoeffektivnykh, resurso- i energosberegayushchikh tekhnologiy i tekhnicheskikh sredst v posleuborochnoy obrabotke zerna i podgotovke semyan [Development and implementation of highly efficient, resource-saving technologies and technical means of post-harvest grain processing and seed preparation]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2009. N1. 2-9 (In Russian). EDN: JXTJCH.
2. Zotikov V.I., Naumkina T.S., Sidorenko V.S. Proizvodstvo zernobobovykh i krupyanykh kultur v Rossii: sostoyanie, problemy, perspektivy [Legumes and groat crops production in Russia: state, problems, perspectives]. *Zemledelie*. 2015. N4. 3-5 (In Russian). EDN: TZVJZF.
3. Panasiewicz M., Mazur J., Zawislak K., et al. The process of separation of husked soybean in oblique airflow. *Sustainability*. 2020. N12. 7566 (In English). DOI: 10.3390/su12187566.
4. Khamuev V.G., Moskovskiy M.N., Borzenko S.I., Gerasimenko S.A. Issledovanie raspredeleniya skorostey vozdushnogo potoka v modeli aspiratsionnogo kanala dlya vysokozasorennoy

- soevoy produktsii [The spreading of air flow velocities in the aspiration channel model for highly clogged soy products]. *Elektrotehnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2022. Vol. 69. N2(47). 86-90 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-2-86-90. EDN: EZXRPO.
5. Khamuev V.G., Moskovskiy M.N., Borzenko S.I. Laboratornye issledovaniya opytного obraztsa gravitatsionno-pnevmaticheskogo zerno-semyaochistitelya [Laboratory studies of a prototype of a gravity-pneumatic grain-seed cleaner]. *Inzhenernyyvestnik Dona*. 2018. N1(48). 89 (In Russian). EDN: XSMPQL.
 6. Zyulin A.N., Khamuyev V.G. Teoreticheskoe issledovanie pnevmoseparacii zernovogo materiala v vertikalno voskhodyashchem potoke [Theoretical research of pneumatic separation of grain material in the vertical raising air flow]. *Tekhnika v sel'skokhozyajstve*. 2008. N2. 3-6 (In Russian).
 7. Moskovskiy M.N., Khamuev V.G., Gerasimenko S.A., Borzenko S.I., et al. Proizvodstvennye ispytaniya zernoochistitel'noy mashiny s programmno-apparatnym upravleniem v sostavetehnologicheskoylinii [Production tests of a grain-cleaning machine with software and hardware control as part of a technological line]. *Elektrotehnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2021. Vol. 68. N4(45). 112-117 (In Russian). DOI: 10.22-314/2658-4859-2021-68-4-112-117. EDN: LCMBQU.
 8. Moskovskiy M.N., Khamuev V.G., Borzenko S.I., et al. Tekhnologicheskyy aspekt razdeleniya semyan kukuruzy po indeksu formy [The technological aspect of the separation of corn seeds by shape index]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2019. N11 (137). 182-184 (In Russian). EDN: SQBKBZ.
 9. 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. N4 (In English).
 10. Kroulik M., Hüla J., Rybka A., Honzík I. Pneumatic conveying characteristics of seeds in a vertical ascending airstream. *Research in Agricultural Engineering*. 2016. 62. 56-63 (In English). DOI: 10.17221/32/2014-RAE.
 11. Lukaszuk J., Molenda M., Horabik J., et al. Airflow resistance of wheat bedding as influenced by the filling method. *Research in Agricultural Engineering*. 2008. 54. 50-57 (In English). DOI: 10.17221/8/2008-RAE.
 12. Burkov A., Glushkov A., Lazykin V., Mokiev V. Substantiation of the main design parameters of the separation chamber of the pneumatic separator using various methods for calculating particle trajectories in the pneumoseparating channel. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2022. 23. 402-410 (In English). DOI: 10.30766/2072-9081.2022.23.3.402-410.
 13. Badretdinov I.D., Mudarisov S.G. Nauchnoe obosnovanie i sovershenstvovanie pnevmaticheskikh sistem sel'skokhozyaystvennykh mashin na osnove opisaniya tekhnologicheskogo processa [Scientific justification and improvement of pneumatic systems for agricultural machines based on the simulation of technological process]. *Vestnik NGIEI*. 2019. N9(100). 12 (In Russian).
 14. Khamuev V.G. Raspredelenie skorostey vozdušnogo potoka v glubokom pnevmosepariruyushchem kanale [Distribution of air flow velocities in a deep pneumatic separating channel]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2015. N4. 12-15 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Московский М.Н. – научное руководство;

Борзенко С.И. – проведение научных исследований, написания основного текста статьи, подбор и формирование списка литературы, подготовка к публикации.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Moskovskiy M.N. – scientific guidance;

Borzenko S.I. – conducting scientific research, writing the main text of the article, selecting and forming a list of references, preparing for publication.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

02.10.2023
08.11.2023