

Разработка и исследования воздушно-решетной зерноочистительной машины МЗУ-20Д

Петр Алексеевич Савиных,
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
заведующий лабораторией,
e-mail: peter.savinyh@mail.ru;

Юрий Вячеславович Сычугов,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник;
Владимир Аркадьевич Казаков,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: kazakov.vladimir.263@mail.ru

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

Реферат. Проанализировали рабочий процесс и конструкции машин, задействованных в зерноочистке. Выявили, что энергоёмкость универсальных воздушно-решетных машин отечественного и зарубежного производства составляет 0,86-1,61 киловатт-часа на тонну, удельная металлоёмкость – 30-700 килограмм-часов на тонну. (*Цель исследований*) Разработать высокопроизводительную зерноочистительную машину первично-вторичной очистки с малой энергоёмкостью, высокой степенью очистки семенного и продовольственного зерна, а также с возможностью ее установки в поточных зерноочистительно-сушильных линиях и комплексах. (*Материалы и методы*) Создали новую конструктивно-технологическую схему универсальной зерноочистительной машины МЗУ-20Д и ее пневмосистемы. Изготовили опытный образец производительностью 20 тонн в час, с тремя пневмосепарирующими каналами и тремя осадочными камерами пневмосистемы. Исследовали пылеуловитель воздушной системы машины МЗУ-20Д. (*Результаты и обсуждение*) С применением конечно-элементного метода получили расчетные величины и векторы скоростей воздушного потока в узловых точках сечения пылеуловителя. Жалюзийную решетку пористостью 0,1 установили под углом 30 градусов, при наличии делительной перегородки. Оптимизировали конструктивно-технологические параметры по матрице трехуровневого плана Бокса – Бенкина. По результатам реализации плана выбрали рациональные конструктивные параметры пылеуловителя: глубина выходного патрубка – 0,35 метра, угол установки жалюзи – 30 градусов, число жалюзи – 8. Определили, что при приведении в соответствие параметров пылеуловителя вышеуказанным значениям эффективность осаждения примесей в нем достигает 60 процентов при гидравлическом сопротивлении 260 паскалей. В ходе государственных испытаний машины МЗУ-20Д в СПК «Рассвет» Кировской области на очистке зерна ржи сорта Фаленская подтвердили характеристики: пропускная способность – до 20 тонн в час, установленная мощность – 9 киловатт, чистота зерна – не менее 98 процентов. (*Выводы*) Установили, что машина работоспособна, качественно выполняет технологический процесс и может быть использована, например, при реконструкциях и разработке новых зерноочистительно-сушильных линий и комплексов.
Ключевые слова: зерноочистка, подготовка семян, очистка семян, зерноочистительная машина, зерноочистительно-сушильные комплексы.

■ **Для цитирования:** Савиных П.А., Сычугов Ю.В., Казаков В.А. Разработка и исследования воздушно-решетной зерноочистительной машины МЗУ-20Д // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №2. С. 59-66. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-2-59-66.

Development and Research of the MZU-20D Air-Sieve Grain Cleaning Machine

Petr A. Savinykh,
Dr.Sc.(Eng.), professor, chief researcher,
head of the laboratory,
e-mail: peter.savinyh@mail.ru;

Yuri V. Sychugov,
Dr.Sc.(Eng.), senior researcher;
Vladimir A. Kazakov,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: kazakov.vladimir.263@mail.ru

Federal Agricultural Scientific Center of North-East, Kirov, Russian Federation

Abstract. The authors analyzed the working process and design of the machines involved in grain cleaning. It was revealed that the energy intensity of universal air-sieve machines of domestic and foreign production is 0.86-1.61 kilowatt-hours per ton, the specific metal consumption is 30-700 kilogram-hours per ton. (*Research purpose*) To develop a high-performance primary-secondary grain cleaning machine with low energy intensity, a high degree of purification of seed and food grain, as well as with the possibility of its installation in continuous grain cleaning and drying lines and complexes. (*Materials and methods*) The authors created a new structural and technological scheme of the universal grain cleaning machine MZU-20D and its pneumatic system. A prototype was produced with a capacity of 20 tons per hour, with three pneumatic separating channels and three sedimentary chambers of the pneumatic system. They investigated the dust collector of the air system of the MZU-20D machine. (*Results and discussion*) Using the finite element method, the calculated values and velocity vectors of the air flow at the nodal points of the dust collector cross-section were obtained. The louvered sieve with a porosity of 0.1 was installed at an angle of 30 degrees, in the presence of a dividing partition. The authors optimized the structural and technological parameters according to the three-level Boxing-Bencina matrix plan. Based on the results of the plan's implementation, rational design parameters of the dust collector were chosen: the depth of the outlet pipe – 0.35 meters, the angle of blinds installation – 30 degrees, the blinds number – 8. It was determined that when the dust collector parameters were brought into line with the above values, the efficiency of the deposition of impurities in it reached 60 percent with hydraulic resistance of 260 pascals. During state tests of the MZU-20D machine at the SPK Rassvet in the Kirov region for cleaning rye grains of the Falenskaya variety, the following characteristics were confirmed: throughput – up to 20 tons per hour, installed capacity – 9 kilowatt, grain purity – at least 98 percent. (*Conclusions*) It was established that the machine was efficient, performed the technological process qualitatively and could be used, for example, during reconstruction and development of new grain cleaning and drying lines and complexes.

Keywords: grain cleaning, seed preparation, seed cleaning, grain cleaning machine, grain cleaning and drying complexes.

■ **For citation:** Savinykh P.A., Sychugov YU.V., Kazakov V.A. Razrabotka i issledovaniya vozdušno-reshetnoy zernoochistitel'noy mashiny MZU-20D [Development and research of the MZU-20D air-sieve grain cleaning machine]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N2. 59-66 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-2-59-66.

Стратегия развития сельского хозяйства России включает совершенствование машинно-технологической базы отрасли, в том числе на этапе послеуборочной обработки зернобобовых культур [1, 2]. Провели сравнительный анализ почти 200 моделей конструкций зерноочистительных машин зарубежного и отечественного производства, а также свыше 4 тыс. патентов путем применения современных пакетов прикладных программ [3, 4]. Наибольшее количество разработок посвящено решетным сепараторам – 42%, пневмосепараторам – 31%, триерам – 11%, вибропневмосепараторам – 10%, машинам спецназначения – 6% (рис. 1). Утвердилась тенденция создания комбинированных зерно-семяочистительных машин. В этих машинах применяют двукратную воздушную сепарацию, а для повышения эффективности их работы используют фракционирование воздушным потоком и решетками.

Удельная энергоёмкость решетных машин предварительной очистки как отечественного, так и зарубежного производства находится приблизительно в одинаковых пределах и составляет 0,12-0,44 кВт·ч/т, универсальных воздушно-решетных машин – 0,86-1,61 кВт·ч/т, вибропневмосепараторов – 1,88-3 кВт·ч/т, триеров – 0,22-0,29 кВт·ч/т, машин специального назначения – 1-13 кВт·ч/т. Удельная металлоёмкость зерноочистительных машин отечественного производства в 1,3-1,8 раза меньше, чем у зарубежных аналогов, и находится в пределах 30-700 кг·ч/т [5, 6].

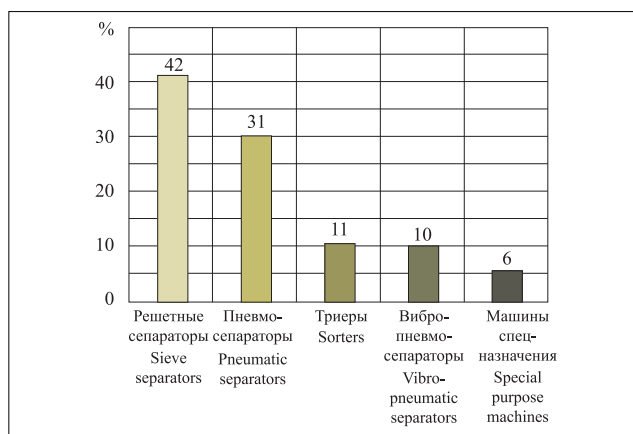


Рис. 1. Зависимость числа разработок машин от типов рабочих органов

Fig. 1. Dependence of machine developments number on the working bodies types

Чтобы уменьшить металлоёмкость, количество операций и транспортирующих рабочих органов, необходимо использовать новые технологии, универсальные или комбинированные сепараторы.

Таким же образом проведен анализ пневмосистем зерноочистительных машин и их рабочих органов, который позволяет считать наиболее перспективным применение разомкнутой пневмосистемы для универсальной зерноочистительной машины, работающей по фракционной технологии на первичной и вторичной очистке зернового материала [7, 8].

Цель исследования – разработать высокопроизводительную зерноочистительную машину первично-вторичной очистки с малой энергоемкостью, высокой степенью очистки семенного и продовольственного зерна, а также с возможностью ее установки в поточных зерноочистительно-сушильных линиях и комплексах.

Материалы и методы. Провели анализ технологий и зерноочистительных машин отечественного и зарубежного производства [9, 10]. Выявили, что эти технические средства несовершенны и не могут качественно выполнять технологический процесс очистки зерна. Их воздушные системы требуют доработки, а некоторые узлы необходимо исследовать и усовершенствовать. В ФАНЦ Северо-Востока разработали зерноочистительную машину МЗУ-20Д (*патент RU № 2513391*) первично-вторичной очистки с возможностью фракционирования. Она имеет пневмосистему разомкнутого типа (*патент RU № 2229787*) с вентилятором, двумя осадочными камерами, жалюзийным противоточным пылеуловителем и пневмосепарирующими каналами дорешетной и двумя послерешетной аспирации (рис. 2).

Новизна и отличие конструкции и технологического процесса машины от аналогов заключается в следующем. Вертикальная часть канала послерешетной аспирации разделена двумя сплошными вертикальными стенками, параллельными боковым стенкам канала. Образуются три секции канала. Средняя секция представляет собой первый канал послерешетной аспирации и снабжена механизмом независимого регулирования скорости воздуха, а также устройством ввода зерна в канал. Боковые секции формируют второй канал послерешетной аспирации. Они снабжены механизмом независимого регулирования скорости воздуха и устройством ввода зерна в канал. При этом на скатных досках среднего и нижнего ярусов решет нижнего решетчатого стана смонтированы пластины для направления зерновых фракций в соответствующие устройства ввода зерна. Через них зерно поступает в каналы послерешетной аспирации для равномерного распределения по ширине канала. Первый и второй каналы послерешетной аспирации образованы в результате разделения вертикальной части общего канала послерешетной аспирации двумя сплошными стенками, что значительно упрощает конструкцию и снижает металлоемкость каналов.

Кроме того, устройство ввода зерновой фракции во второй канал послерешетной аспирации смонтировано вне зоны забора воздуха в первый канал послерешетной аспирации и не нарушает однородности воздушного потока в нем, что повышает эффективность очистки зерна от примесей.

В итоге конструктивное исполнение элементов пневмосепарирующей системы и решетчатой части упрощается, металлоемкость машины снижается, а

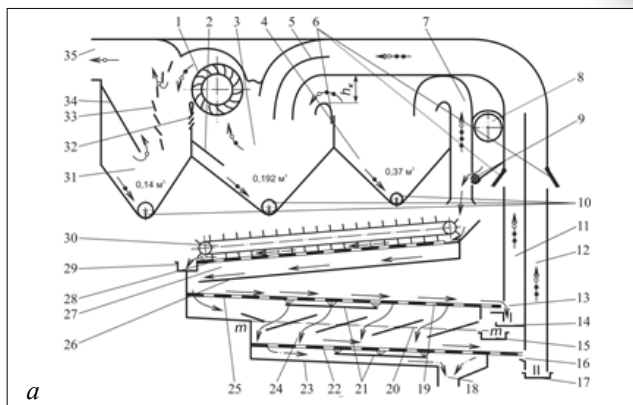


Рис. 2. Конструктивно-технологическая схема (а) и общий вид машины первично-вторичной очистки МЗУ-20Д (б):

1 – вентилятор; 2 – перегородка; 3 – вторая осадочная камера; 4 – первая осадочная камера; 5 – перегородка; 6 – регулировка скорости; 7 – канал дорешетной аспирации; 10 – выходные шнеки; 11 – первый пневмосепарирующий канал послерешетной аспирации; 12 – второй пневмосепарирующий канал; 13, 16 – вводные окна в первый и второй пневмосепарирующие канал; 14, 15, 17, 18 – приемники зернового материала; 20 – скатные доски; 21 – щетки; 22, 25, 28 – решета; 23 – скатная доска; 24 – нижний решетчатый стан; 26 – скатная доска верхнего решетчатого стана; 27 – верхний решетчатый стан; 29 – приемное устройство крупных примесей; 30 – скребковый транспортер; 31 – осадочная камера пылеуловителя; 32 – жалюзийная перегородка; 33 – жалюзийная решетка; 34 – разделительная перегородка; 35 – выходной патрубок

Fig. 2. Structural-technological scheme (a) and general view of the primary-secondary cleaning machine MZU-20D (b):

1 – fan; 2 – partition; 3 – second sedimentary chamber; 4 – first sedimentary chamber; 5 – partition; 6 – speed adjustment; 7 – channel pre-sieve aspiration; 10 – output screws; 11 – first pneumatic separation channel post-sieve aspiration; 12 – second pneumatic separation channel; 13, 16 – input windows into the first and second pneumatic separating channel; 14, 15, 17, 18 – receivers of grain material; 20 – pitched boards; 21 – brushes; 22, 25, 28 – sieves; 23 – pitched board; 24 – lower sieve mill; 26 – pitched board of the upper sieve mill; 27 – upper sieve mill; 29 – receiving device of large impurities; 30 – scraper conveyor; 31 – sedimentary chamber of the dust collector; 32 – lowered partition; 33 – lowered sieve; 34 – dividing wall; 35 – outlet pipe

эффективность очистки от легких примесей зерновой фракции, поступившей в первый канал послерешеточной аспирации, повышается.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Качественные показатели работы машины МЗУ-20Д зависят от работы ее решетчатой части и пневмосистемы. Провели анализ экспериментальных и теоретических исследований, конструкций устройств очистки воздуха от легких примесей [11, 12]. Разработали устройство для создания воздушного потока и очистки его от пыли (*патент № 2294235*) и установили в пневмосистему разомкнутого типа зерноочистительной машины МЗУ-20Д (рис. 3).

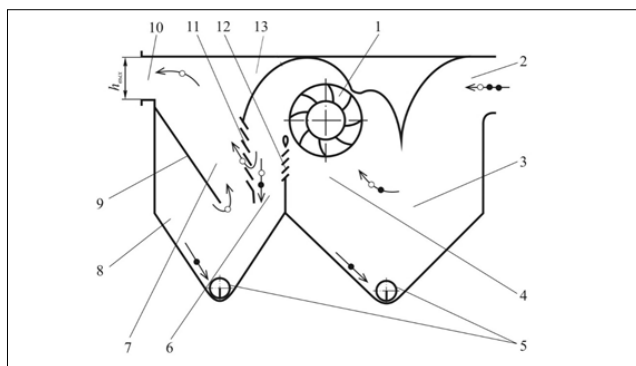


Рис. 3. Схема устройства для создания и очистки воздушного потока от примесей: 1 – диаметральный вентилятор; 2 – входной патрубок; 3 – осадочная камера; 4 – входное окно; 5 – выходные устройства пылевидных отходов; 6, 7 – выходные патрубки; 8, 13 – осадочная камера; 9 – разделительная перегородка; 10 – выходной патрубок; 11 – жалюзийная решетка; 12 – смежная жалюзийная стенка

Fig. 3. The device scheme for creating and cleaning the air flow from impurities: 1 – diametrical fan; 2 – inlet pipe; 3 – sedimentary chamber; 4 – input window; 5 – output devices of pulverized waste; 6, 7 – output nozzles; 8, 13 – sedimentary chamber; 9 – dividing wall; 10 – outlet pipe; 11 – louvered sieve; 12 – adjacent louvered wall

Запыленный воздушный поток посредством вентилятора поступает через входной патрубок, пройдя осадочную камеру, в которой происходит предварительное осаждение примесей. Далее через входное окно он проходит межлопаточное пространство вентилятора и подается во входное окно пылеуловителя – выходного окна этого вентилятора. Частицы пыли воздушного потока, скользя по жалюзийной решетке, попадают в осадочную камеру и оседают на ее дне, а затем удаляются наружу. Очищенный воздушный поток выходит наружу.

Применение предлагаемого устройства, которое объединяет в себе генератор воздушного потока и пылеуловитель, а также входит в состав пневмосистемы, позволит снизить металлоемкость и уменьшить габаритные размеры машины.

При внедрении устройства в пневмосистему ма-

шины, габаритные размеры решет и отдельных узлов создали определенные трудности при размещении пылеуловителя, параметры которого выбраны с учетом рекомендаций ученых и исследователей. Чтобы скорректировать изменения, исследовали движение воздушного потока в камере пылеуловителя с помощью конечно-элементного метода. Предстояло выравнять поля скоростей потока на выходе из пылеуловителя с последующей оптимизацией конструктивных параметров. Камеру пылеуловителя разбили на ряд элементов. Каждый элемент рассмотрели отдельно. Затем провели аппроксимацию потенциала скоростей u во всей области сечения, используя базисные функции ϕ_i , по уравнению (1):

$$u = \sum_{i=1}^S \phi_i u_i = \{\phi\}^T \{u\}^n, \quad (1)$$

где i – номер узла в местной системе для треугольного элемента с $S = 3$;

m – количество треугольных элементов;

n – количество узлов в треугольном элементе.

Выведем матрицы КЭ (конечные элементы) на основании уравнения Лапласа с граничными условиями:

$$h_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + h_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0, \quad (2)$$

где h_x, h_y – коэффициенты фильтрации, которые могут быть различными в разных направлениях с граничными условиями обоих типов:

$$1) u = \bar{u} \text{ на } S_1;$$

$$2) h \frac{\partial u}{\partial n} = \bar{q}_n \text{ на } S_2;$$

$$\bar{q}_n = \alpha_{nx} h_x \frac{\partial u}{\partial x} + \alpha_{ny} h_y \frac{\partial u}{\partial y}. \quad (3)$$

Для решения уравнения (2) используем вариационную формулировку метода Галеркина и, проведя математические преобразования, получаем уравнение:

$$\begin{aligned} & \delta \{u\}^{n,m} \frac{1}{4A^2} \iint_{(A)} \{h_x \{b\} \{b\}^m + \\ & + h_y \{\alpha\} \{\alpha\}^m\} dx dy \{u\}^n = \\ & = \delta \{u\}^{n,m} \int_{(S)} \{\phi\} \bar{q}_n dS. \end{aligned} \quad (4)$$

После интегрирования для каждого элемента приходим к уравнениям:

$$[K^e] \{u\}^n = \{P^e\}, \quad (5)$$

где K^e – матрица коэффициентов влияния для треугольного элемента.

Объединяя (5) по всей области течения, получим

уравнение:
 $[K]\{u\}_n = \{P\},$ (6)

где $\{u\}_n$ – глобальные узловые неизвестные.

Решение уравнения (6) дает потенциалы скоростей во всех точках области, по которым с помощью вы-

ражений (7) получаем значение скоростей $\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix}$ в каждом КЭ:

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} h_x b_1 & h_x b_2 & h_x b_3 \\ h_y \alpha_1 & h_y \alpha_2 & h_y \alpha_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{n1} \\ u_{n2} \\ u_{n3} \end{Bmatrix}.$$
 (7)

По изложенному алгоритму составлены компьютерные программы для расчета скоростей воздушно-го потока.

Для качественного исследования потока воздуха в пылеуловителе его камеру в масштабе разбили на конечные элементы – треугольники (рис. 4). Жалюзийная решетка принимается в виде области, пористость которой варьируется по величине и направлению. Изменяемым параметром также является наличие или отсутствие делительной перегородки.

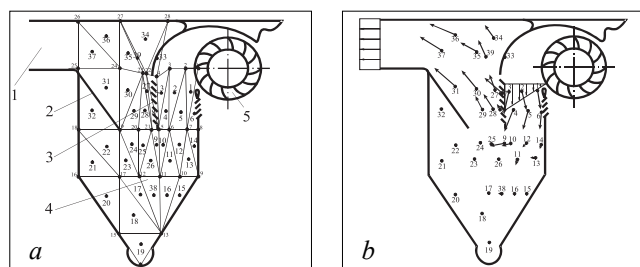


Рис. 4. Технологическая схема пылеуловителя: а – схема разбиения его на элементы; б – величины и направления векторов скоростей воздушного потока:

1 – входной патрубков; 2 – делительная перегородка 3 – жалюзийная решетка; 4 – 38-й элемент осадочной камеры

Fig. 4. Technological scheme of the dust collector: а – scheme of its division into elements, б – values and directions of vectors of air flow velocities:

1 – inlet pipe; 2 – dividing partition; 3 – louvered sieve; 4 – 38th element of the sedimentary chamber

Проведены исследования четырех вариантов конструкций пылеуловителя.

В результате численного эксперимента получены расчетные величины и векторы скоростей воздушного потока в точках сечения пылеуловителя при различных исходных данных. Наиболее приемлемый вариант – жалюзийная решетка пористостью 0,1, установленная под углом 30° при наличии делительной перегородки.

В этом случае воздушный поток доходит до элемента 38 (рис. 4). Причем вектор скорости имеет малую величину, а в соседних элементах, где векторы также незначительны или равны нулю, создаются бла-

гоприятные условия для осаждения пыли. Очищенный воздух, прошедший через жалюзийную решетку, смешивается с потоком воздуха из патрубка противоточного отделителя и удаляется в атмосферу через выходной патрубок.

Вентилятор для пневмосистемы выбирали с учетом его размеров, типа и конструкции, из числа исследованных и оптимизированных. За прототип взяли диаметральный вентилятор (патенты № 2192563, 2213888, 2174626): рабочее колесо диаметром $D_2 = 0,4$ м; число цилиндрических лопаток $z = 24$; радиус лопаток $R_l = 0,039$ м с углами их установки $\beta_1 = 82^\circ$ и $\beta_2 = 160^\circ$; углы кривизны и разворота спирали корпуса $\alpha = 76^\circ$ и $\varphi_{max} = 165^\circ$ соответственно; смежная стенка с пылеуловителем с числом жалюзи $z_{ж} = 4$ и углом их установки $\gamma_{ж} = 35^\circ$.

По проведенным ранее исследованиям первый пневмоканал канал выбрали глубиной 0,18 м, второй и третий – 0,125 м. Объем осадочных камер: первой – 0,17 м³, второй – 0,192 м³, пылеуловителя – 0,14 м³. Проверили работу пневмосистемы с установленным вентилятором при оборотах рабочего колеса 825 мин⁻¹. В пневмосепарирующем канале дроссельными заслонками имитировали зерновую нагрузку от 0 до 1.

Изучено влияние аэродинамических характеристик работы вентилятора для рассматриваемой пневмосистемы в нагнетающей и всасывающей сети. Установлено, что наилучший КПД вентилятора в сети достигает $\eta = 0,4$ при расходе воздуха $Q = 9$ м³/с и потребляемой мощности $N = 1,75$ кВт. При полной нагрузке вентилятора имеем: $\eta = 0,32$, $Q = 1,25$ м³/с, $N = 2,6$ кВт. Проведенные исследования показали стабильную работу вентилятора, способную обеспечить нужный режим качественной сепарации зерна.

Провели оптимизацию наиболее важных конструктивных параметров пылеуловителя. Выделили: x_1 – угол наклона жалюзи в жалюзийной решетке; x_2 – глубина выходного патрубка жалюзийного пылеуловителя ($h_{вых}$); x_3 – число жалюзи в жалюзийной решетке при фиксированных длине l и шаге S пластин в решетке (рис. 5).

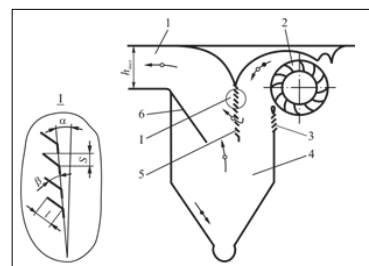


Рис. 5. Схема оптимизируемого пылеуловителя: 1 – выходной патрубок; 2 – вентилятор; 3 – жалюзийная стенка; 4 – осадочная камера; 5 – жалюзийная решетка; 6 – перегородка

Fig. 5. Scheme of the optimized dust collector: 1 – outlet pipe; 2 – fan; 3 – louvered wall; 4 – sedimentary chamber; 5 – louvered sieve; 6 – partition

ФАКТОРЫ И УРОВНИ ИХ ВАРЬИРОВАНИЯ FACTORS AND ITS VARIATION LEVELS					
Уровни Levels	Факторы Factors			Критерии оптимизации Optimization criteria	
	угол наклона жалюзи в решетке, β , град. angle of the blinds in the sieve, β , degrees	глубина выходного патрубка, $h_{\text{вых}}$, м outlet pipe depth, $h_{\text{вых}}$, m	число жалюзей в жалюзийной решетке z , шт. number of blinds in the louvered sieve z , pcs.	эффективность осаждения примесей E_o , % efficiency of the deposition of impurities E_o , %	аэродинамическое сопротивление пылеуловителя P_y , Па aerodynamic drag, P_y , Pa
	x_1	x_2	x_3	\bar{y}_1'	\bar{y}_2'
Верхний (+1) Upper (+1)	35	0,35	12	—	—
Основной (0) Principal (0)	30	0,30	10	—	—
Нижний (-1) Lower (-1)	25	0,25	8	—	—

Глубина осадочной камеры с учетом конструктивных ограничений принята максимально возможной. В качестве критериев оптимизации выбраны y_1 – эффективность выделения примесей E_o и y_2 – аэродинамическое сопротивление пылеуловителя PSV (таблица).

Для достижения максимальной эффективности и осаждения примесей и минимального значения аэродинамического сопротивления реализовали план Бокса – Бенкина для матрицы 2^3 , получив математические модели:

$$y_1 = 60,1 + 2,75x_1 + 3,4x_2 + 1,53x_3 - 1,69x_1^2 + 2,03x_1x_2 - 4,83x_1x_3 - 3,64x_2^2 - 1,23x_2x_3 - 9,99x_3^2; \quad (8)$$

$$y_2 = 289,3 + 11,45x_1 + 27,14x_2 + 10,79x_3 + 0,65x_1^2 + 2,73x_1x_2 - 21,18x_1x_3 - 28,03x_2^2 - 7,2x_2x_3 - 48,73x_3^2. \quad (9)$$

Математические модели анализировали графически методом наложения двумерных сечений поверхностей отклика (рис. 6).

Анализ двумерных сечений модели 8 (рис. 6а, 6б) показывает, что максимальная эффективность осаждения примесей $E_o = 56,4\%$ наблюдается при числе жалюзи $z = 8$, угле их наклона $\beta = 35^\circ$ и глубине выходного патрубка пылеуловителя $h_{\text{вых}} = 0,35$ м. При этом гидравлическое сопротивление равно 264,4 Па. Однако минимальное сопротивление пылеуловителя 262 Па достигается при $z = 12$ штук и $h_{\text{вых}} = 0,35$ м.

Анализ двумерных сечений модели 9 (рис. 6с, 6д) показывает, что максимальная эффективность осаждения примесей $E_o = 60,5\%$ достигается при угле установки жалюзи $\beta = 30^\circ$ и глубине выходного патрубка $h_{\text{вых}} = 0,32$ м, при этом гидравлическое сопротивление пылеуловителя составляет 258 Па.

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить основные рациональные параметры инерционного жалюзийно-противоточного пылеуловителя: глубина выходного патрубка $h_{\text{вых}} = 0,35$ м;

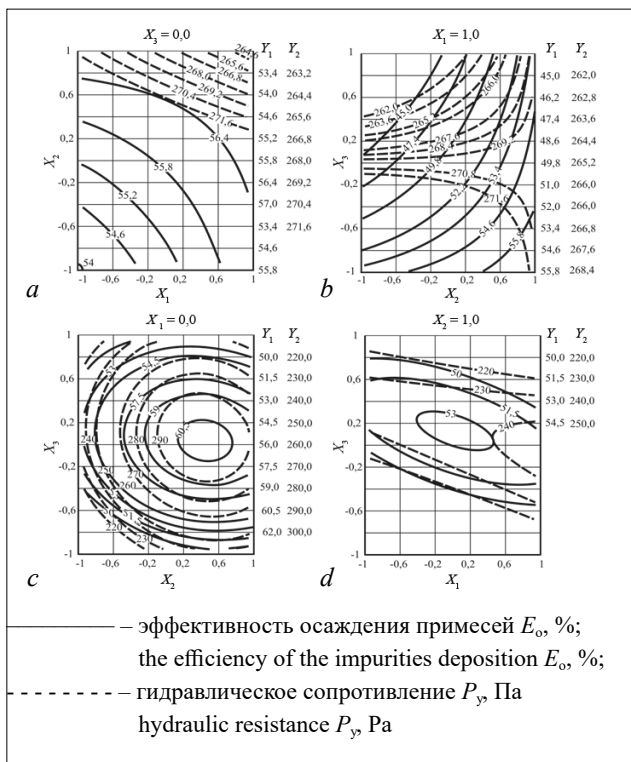


Рис. 6. Двумерные сечения поверхностей откликов для критериев оптимизации y_1 – эффективности выделения примесей E_o и y_2 – аэродинамического сопротивления пылеуловителя PSV : а – при $x_3 = 0$; б – при $x_1 = 1$; с – при $x_1 = 0$; д – при $x_2 = 1$

угол установки жалюзи $\beta = 30^\circ$; число жалюзи $z = 10$. При этом эффективность осаждения примесей достигает $E_o = 60\%$, гидравлическое сопротивление пылеуловителя $P_y = 260$ Па.

ФГУ «Кировская МИС» (протокол № 06-34-2008) провела государственные испытания зерноочистительной машины МЗУ-20Д в режиме вторичной очистки

ки на зерне ржи сорта Фаленская по фракционной технологии на подачах от 6000 до 19000 кг/ч с влажностью 12%, чистотой 97-98% в СПК «Рассвет» Кировской области. Испытания показали следующее:

1. За один проход крупная фракция по содержанию семян основной культуры и наличию в них различных примесей соответствовала нормам, предъявляемым к элитным семенам, на подачах от 6000 до 15000 кг/ч, а на подаче до 19000 кг/ч – характеристикам репродукционных семян.

2. Мелкая фракция по содержанию семян основной культуры соответствовала нормам репродукционных семян на подачах от 6000 до 13000 кг/ч, а от 13000 до 19000 кг/ч – категории репродукционных семян для производства товарной продукции.

3. Потери зерна основной культуры в отход составили 1,86-3,35% (при требованиях не более 5%), дробление не превысило 0,2% (при норме до 1%).

Определено, что машина работоспособна, качественно выполняет технологический процесс и может быть использована, например, при реконструкциях и разработке новых зерноочистительно-сушильных линий и комплексов. ФГУ «Кировская МИС» рекомендует изготовить опытную партию данных машин с учетом устранения полученных при проведении испытаний замечаний.

Выводы

1. Провели анализ конструкций зерноочистительных машин. На его основе разработали и изготовили опытный образец универсальной зерноочистительной машины МЗУ-20Д. С учетом уровня техники вы-

брали тип воздушной системы для данной зерноочистительной машины, определили основные величины конструктивных и технологических параметров ее каналов и осадочных камер.

2. Для пневмосистемы машины МЗУ-20Д разработали конструктивно-технологическую схему пылеуловителя. Исследовали движение воздушного потока в камере пылеуловителя с помощью конечно-элементного метода, получили расчетные величины и векторы скоростей воздушного потока в узловых точках пылеуловителя при установке жалюзийной решетки пористостью 0,1 под углом 30°, при наличии делительной перегородки.

3. Оптимизировали основные конструктивно-технологические параметры пылеуловителя, для чего реализовали план Бокса – Бенкина для матрицы 2³. Выбрали рациональные конструктивные параметры пылеуловителя: глубина выходного патрубка $h_{\text{вых}} = 0,35$ м, угол установки жалюзи $\beta = 30^\circ$, число жалюзи $z = 8$. При приведении в соответствие параметров пылеуловителя вышеуказанным значениям эффективность осаждения примесей в нем достигает $E_o = 60\%$ при гидравлическом сопротивлении пылеуловителя $P_y = 260$ Па.

4. Государственные испытания, проведенные Кировской МИС, подтвердили, что машина работоспособна, качественно выполняет технологический процесс и может быть использована, например, при реконструкции и разработке новых зерноочистительно-сушильных линий и комплексов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурков А.И. Тенденции развития воздушно-решетных зерноочистительных машин на современном этапе // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2018. N2(63). С. 4-15.

2. Бурков А.И., Глушков А.Л., Лазыкин В.А. Разработка зерноочистительных машин, функционирующих по фракционной технологии // *Пермский аграрный вестник*. 2018. N3(23). С. 12-19.

3. Сысуев В.А., Кедрова Л.И., Уткина Е.И., Лаптева Н.К. Методы и технологии промышленной переработки зерна озимой ржи с целью эффективного использования в хлебопекарной, комбикормовой, крахмалопаточной и других отраслях промышленности // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2013. N1(32). С. 4-10.

4. Савиных П.А., Сычугов Ю.В., Казаков В.А. Фракционная технология и устройства послеуборочной обработки и переработки зерна плющением // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N4. С. 16-21.

5. Marczuk A., Caban J., Kartashevich A., Plotnikov S.A., Savinykh P.A., Gardyński L. Production and Use of Rapeseed Oil in Power Plant Machinery in the Northeast of European Part. *Jökull Journal*. 2017. Vol. 67. N8. 8-21.

6. Сысуев В.А., Сайтов В.Е., Сайтов А.В. Состояние про-

блемы очистки зернового вороха от вредных примесей // *Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства*. 2016. N18. С. 248-253.

7. Бурков А.И., Глушков А.Л., Лазыкин В.А. Влияние зернового материала на поле скоростей и расчетные траектории частиц в вертикальном пневмосепарирующем канале // *Энергосберегающие агротехнологии и техника для северного земледелия и животноводства: Монография / под общей редакцией В.А. Сысуева*. Киров: Кировская областная типография. 2018. С. 7-15.

8. Сысуев В.А., Алешкин А.В., Сычугов Ю.В., Исупов Ю.А. Комбинированные расчетные схемы в математических моделях процессов фракционирования зерна // *Теоретическая и прикладная экология*. 2018. N4. С. 24-29.

9. Dal-Pastro E., Facco P., Bezzo E., Zamprognia E., Barolo M. Data-driven modelling of milling and sieving operations in wheat milling process. *Food and Bioproducts Processing*. 2016. Vol. 99. 99-108.

10. Bulgakov V., Pascuzzi S., Ivanovs S., Kaletnik G., Yanovich V. Angular oscillation model to predict the performance of a vibratory ball mill for the fine grinding of grain. *Biosystems*

Engineering. 2018. Vol. 171. 155-164.

11. Smejtkova A., Vaculik P., Prikryl M. Rating of malt grist fineness with respect to the used grinding equipment. *Research in Agricultural Engineering*. 2016. N62(3). 141-146.

12. Солонщиков П.Н., Мошонкин А.М., Доронин М.С. Со-

вершенствование машин и оборудования в производстве кормов в животноводстве // *Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического университета*. 2017. N9(76). С. 64-76.

REFERENCES

1. Burkov A.I. Tendentsii razvitiya vozdušno-reshetnykh zernoochistitel'nykh mashin na sovremenno etape [Trends in the development of air-sieve grain cleaning machines at the present stage]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*. 2018. N2(63). 4-15 (In Russian).

2. Burkov A.I., Glushkov A.L., Lazykin V.A. Razrabotka zernoochistitel'nykh mashin, funktsioniruyushchikh po fraktsionnoy tekhnologii [The development of grain cleaning machines operating according to fractional technology]. *Permskiy agrarnyy vestnik*. 2018. N3(23). 12-19 (In Russian).

3. Sysuev V.A., Kedrova L.I., Utkina E.I., Lapteva N.K. Metody i tekhnologii promyshlennoy pererabotki zerna ozimoy rzhi s tsel'yu effektivnogo ispol'zovaniya v khlebopekarnoy, kombikormovoy, krakhmalopatochnoy i drugikh otraslyakh promyshlennosti [Methods and technologies for the industrial processing of winter rye grain for the purpose of efficient use in bakery, animal feed, starch and other industries]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*. 2013. N1(32). 4-10 (In Russian).

4. Savinykh P.A., Sychugov Yu.V., Kazakov V.A. Fraktsionnaya tekhnologiya i ustroystva posleuborochnoy obrabotki i pererabotki zerna plyushcheniem [Fractional technology and devices for post-harvest processing and processing of grain by flattening]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N4. 16-21 (In Russian).

5. Marczuk A., Caban J., Kartashevich A., Plotnikov S.A., Savinykh P.A., Gardyński L. Production and Use of Rapeseed Oil in Power Plant Machinery in the Northeast of European Part. *Jökull Journal*. 2017. Vol. 67. N8. 8-21 (In English).

6. Sysuev V.A., Saitov V.E., Saitov A.V. Sostoyanie problemy ochistki zernovogo vorokha ot vrednykh primesey [The state of the problem of cleaning grain heap from harmful impurities]. *Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva i pererabotki produktsii sel'skogo khozyaystva*. 2016. N18. 248-253 (In Russian).

7. Burkov A.I., Glushkov A.L., Lazykin V.A. Vliyanie zernovogo materiala na pole skorostey i raschetnye traektorii chastits v vertikal'nom pnevmosepariruyushchem kanale [The effect of grain material on the velocity field and calculated particle trajectories in a vertical pneumatic separating channel]. *Energo-sberegayushchie agrotekhnologii i tekhnika dlya severnogo zemledeliya i zhivotnovodstva: Monografiya / ed. V.A. Sysuev*. Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipografiya. 2018. 7-15 (In Russian).

8. Sysuev V.A., Aleshkin A.V., Sychugov Yu.V., Isupov Yu.A. Kombinirovannyye raschetnye skhemy v matematicheskikh modelyakh protsessov fraktsionirovaniya zerna [Combined design schemes in mathematical models of grain fractionation processes]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2018. N4. 24-29 (In Russian).

9. Dal-Pastro E., Facco P., Bezzo E., Zamprogna E., Barolo M. Data-driven modelling of milling and sieving operations in wheat milling process. *Food and Bioproducts Processing*. 2016. Vol. 99. 99-108 (In English).

10. Bulgakov V., Pascuzzi S., Ivanovs S., Kaletnik G., Yanovich V. Angular oscillation model to predict the performance of a vibratory ball mill for the fine grinding of grain. *Biosystems Engineering*. 2018. Vol. 171. 155-164 (In English).

11. Smejtkova A., Vaculik P., Prikryl M. Rating of malt grist fineness with respect to the used grinding equipment. *Research in Agricultural Engineering*. 2016. N62 (3). 141-146 (In English).

12. Solonshchikov P.N., Moshonkin A.M., Doronin M.S. Sovershenstvovanie mashin i oborudovaniya v proizvodstve kormov v zhivotnovodstve [Improving machinery and equipment in the production of feed in animal husbandry]. *Vestnik Nizhegorodskogo gosudarstvennogo inzhenerno-ekonomicheskogo universiteta*. 2017. N9(76). 64-76 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 12.05.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 12.05.2020

Статья принята к публикации 08.06.2020
The paper was accepted
for publication on 08.06.2020