

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМОСЕПАРАТОРА С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ВОЗДУШНЫМ КАНАЛОМ

Дринча Василий Михайлович
Филатов Александр Семенович

Арктический государственный агротехнологический университет

Представлены результаты исследований конструктивно-технологических параметров пневматического сепаратора с горизонтальным воздушным потоком. Эксперименты проводились на макетном образце пневмосепаратора УПС-500, разработанном по предварительно выполненному техническому заданию совместно с ОАО ГСКБ «Зерноочистка» (г. Воронеж). Объектом исследований являлись семена пшеницы. Семенная смесь имела кондиционную влажность и содержала типичные засорители, встречающиеся в семенах. Выявлено, что сепарация зернового материала в горизонтальном или наклонном воздушных потоках имеет ряд преимуществ. Из исходного материала могут быть одновременно выделены примеси с меньшей и большей критической скоростью, чем у основного материала. В сепараторах с горизонтальным или наклонным воздушными потоками, если материал подавать тонким слоем, практически полностью исключается взаимное воздействие друг на друга частиц с различными критическими скоростями. Показано, что на эффективность сепарации семян оказывает влияние комплекс конструктивных и технологических факторов. Для пневмосепаратора с горизонтальным воздушным каналом наиболее значимыми являются: производительность, скорость воздушного потока, глубина сепарационного канала, распределение сепарируемого материала по фракциям. Определены следующие оптимальные параметры сепаратора с горизонтальным пневматическим каналом при разделении семян пшеницы: производительность – 300–1000 кг/ч; скорость воздушного потока в пневматическом канале – 4,2–4,8 м/с, оптимальный угол наклона воздушной камеры к горизонту – $-2,5 - +10^\circ$, диапазон глубины пневматического канала – 340–360 мм. Материалы исследований могут быть использованы в конструкторских организациях, разрабатывающих машины для подготовки семян и обработки зерна, а также в селекционных учреждениях и сельскохозяйственных семенных предприятиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: семена, пневмосепаратор, скорость воздушного потока, фракции, выход фракций, масса 1000 семян.

SUBSTANTIATION OF THE PARAMETERS OF A PNEUMATIC SEPARATOR WITH A HORIZONTAL AIR CHANNEL

Drincha Vasily M.
Filatov Alexander S.

Arctic State Agrotechnological University

The results of studies of the design and technological parameters of a pneumatic separator with a horizontal air flow are presented. The experiments were carried out on a mock-up specimen of the UPS-500 pneumatic separator developed according to completed technical task in association with OOO GSKB 'Zernoochistka' (Voronezh). The object of research was wheat seeds. The seed mixture had a conditioned humidity and contained typical weeds usually found in seeds. It is revealed that the separation of grain material in horizontal or inclined air channels has a number of advantages. Impurities can be simultaneously isolated from the input material at a lower and higher critical rate than that of the basic material. In separators with horizontal or inclined air channels, on condition that there is a thin layer of grain material, the mutual impact of particles with different critical velocities on each other is almost completely excluded. It is shown that the efficiency of seed separation is influenced by a complex of design and technological factors. For a pneumatic separator with a horizontal air channel, the most significant are productivity, air flow velocity, depth of the separation channel, distribution of the separated material by fractions. The following optimal parameters of a separator with a horizontal pneumatic channel for separating wheat seeds were determined: productivity is 300–1000 kg/h, air flow velocity in the pneumatic channel is 4.2–4.8 m/s, optimal angle of inclination of the air chamber to the horizon is $-2.5 - +10^\circ$, the depth range of the pneumatic channel is 340–360 mm. The results of research can be used in design organizations developing machines for seed preparation and grain processing, as well as in breeding institutions and agricultural seed enterprises.

KEYWORDS: seeds, pneumatic separator, air velocity, fractions, fraction yield, thousand-seed weight.

Введение

При переходе к рыночной экономике в сельскохозяйственной отрасли России образовалось значительное количество хозяйств с малыми объемами производства зерна, не имеющих техники для её обработки. Изменились критерии выбора технологий и технических средств обработки зерна и подготовки семян. На первый план выходят растущие требования к стоимости, технологической и конструктивной надёжности, а также к универсальности машин. Одной из задач на данном этапе является разработка зерносемяочистительных машин, доступных сельхозтоваропроизводителям, то есть созданных на принципах, позволяющих упростить конструкции, повысить универсальность и уменьшить цену.

В данном аспекте в последние десятилетия в связи с давлением факторов рынка знаковым событием в технологиях послеуборочной обработки является создание пневмосепараторов с горизонтальным каналом. Появилось несколько производителей сепараторов этого типа, например известные торговые марки отечественных машин «Аэромех», «Алмаз», «Сад» и др. Особо обращает на себя внимание то, что в последние годы эти машины экспонируются на крупнейших выставках в мире, например «Agritechnika» в Германии, и представляют интерес также и для зарубежных потребителей.

Сложившаяся ситуация в некоторой степени является вызовом для учёных и инженеров, так как традиционно считается, что для обработки зерна и подготовки семян сепарация в вертикальных каналах является предпочтительной по сравнению с сепарацией в горизонтальных каналах, так как имеет более высокую эффективность разделения, или точность сепарации. Однако сепарация зерна в наклонных и вертикальных каналах имеет как положительные, так и отрицательные стороны в зависимости прежде всего от выполняемой задачи.

Исторически зерноочистительное дело развивалось таким образом, что было целесообразно иметь на одной машине все сепарирующие устройства – пневмосепаратор, решётный очиститель и триеры. Скомпоновать все эти агрегаты в одну машину в соответствии с технологической схемой обработки материала было удобно с вертикальным каналом прямоугольного сечения. При этом зерно свободно (под действием гравитационных сил) может поступать из канала на решето и обратно [5, 6]. По этой причине наибольшее распространение в сложных зерноочистительных машинах получили пневмосепарирующие вертикальные каналы, вследствие чего подавляющее число исследований было посвящено вопросам совершенствования процессов пневмосепарации в вертикальных воздушных каналах.

В зависимости от взаимодействия воздушного потока и разделяемого материала выделяют четыре основные схемы сепарации: в горизонтальном, наклонном, вертикальном воздушном потоке и по принципу противотока [1, 7, 11].

Горизонтальные и наклонные воздушные потоки обладают тем преимуществом, что направления силы тяжести и аэродинамической силы у них не совпадают, вследствие чего подача вороха может быть осуществлена с помощью простых устройств: транспортёров, бункеров и др. Сила тяжести обеспечивает свободное поступление частиц материала в воздушный поток и его разделение. Каждая отдельная частица описывает в потоке воздуха путь, представляющий собой относительно простую кривую. Число столкновений частиц незначительное в сравнении с вертикальным каналом.

К недостаткам сепараторов с горизонтальным каналом можно отнести неравномерный воздушный поток, а также технические трудности при создании широкой струи воздуха.

Сравнительная оценка работы горизонтальных, наклонных и вертикальных воздушных сепараторов показывает, что точность сепарации зависит прежде всего от концентрации материала в воздушном потоке [7, 10].

В то же время в сепараторах с вертикальным воздушным потоком процесс сепарации происходит в канале, высота которого весьма значительная. Поэтому в вертикальных пневмоканалах воздушный поток оказывает более продолжительное воздействие на материал, частицы имеют возможность занимать разные положения, что нивелирует влияние одного случайного положения входа в поток, т. е. сепарация меньше подвержена влиянию случая и устойчивость сепарации повышается.

На процесс сепарации в вертикальных, а также в горизонтальных пневмоканалах существенное влияние оказывают физико-механические свойства зернового материала, которые изменяются в широком диапазоне не только в зависимости от культуры, влажности, но и от самой технологической операции [3, 4, 8, 9].

В настоящее время в сельскохозяйственной отрасли России образовалось значительное количество хозяйств с малыми объёмами производства зерна (до 500 т в год), для которых являются актуальными недорогие универсальные пневматические сепараторы (УПС). При этом под универсальностью понимается способность сепаратора разделять зерновые смеси разных сельскохозяйственных культур при требуемой технологической эффективности. На основании данных, полученных при сотрудничестве с селекционными центрами страны, выявлено, что аналогичные УПС с горизонтальным воздушным потоком представляют интерес для селекции и семеноводства. В соответствии с принятой классификацией этапов работ в селекции растений (подбор родительских пар по хозяйственно ценным признакам, гибридизация, отбор массовый или индивидуальный по хозяйственным признакам, испытание сорта) УПС могут быть востребованы для IV этапа селекционно-опытных работ.

Цель исследований – обоснование процесса сепарации семян и параметров УПС с горизонтальным воздушным потоком для IV этапа селекционно-опытных работ и небольших фермерских хозяйств.

Методика исследований

Эксперименты проводились на макетном образце пневмосепаратора УПС-500 (рис. 1), разработанном по предварительно выполненному техническому заданию совместно с ОАО ГСКБ «Зерноочистка» (г. Воронеж).

Рабочий процесс пневмосепаратора происходит следующим образом: исходный зерновой материал загружается в бункер, откуда он самотеком поступает в воздушную камеру.

Создаваемый вентилятором воздушный поток разделяет материал по аэродинамическим свойствам на три фракции и отход. В первую фракцию (ближайшая к месту ввода материала) попадают частицы с меньшими значениями коэффициента парусности и с более высокой индивидуальной массой. В последующие фракции (2 и 3) поступают частицы с большими значениями коэффициентов парусности, но с меньшими индивидуальными массами.

Объектом исследований являлись семена пшеницы сорта Мироновская 808. Опыты по разделению семян пшеницы на УПС проводились при изменении скорости воздушного потока в нём от 3,4 до 5,3 м/с и производительности сепаратора в диапазоне 200–1100 кг/час.

Чистота и масса 1000 семян определялись в соответствии с ГОСТ Р 52325-2005 [2], – доверительные границы случайной погрешности результатов измерений – в соответствии со стандартными методиками. Доверительная вероятность была принята равной 0,95, число результатов наблюдений – 3.

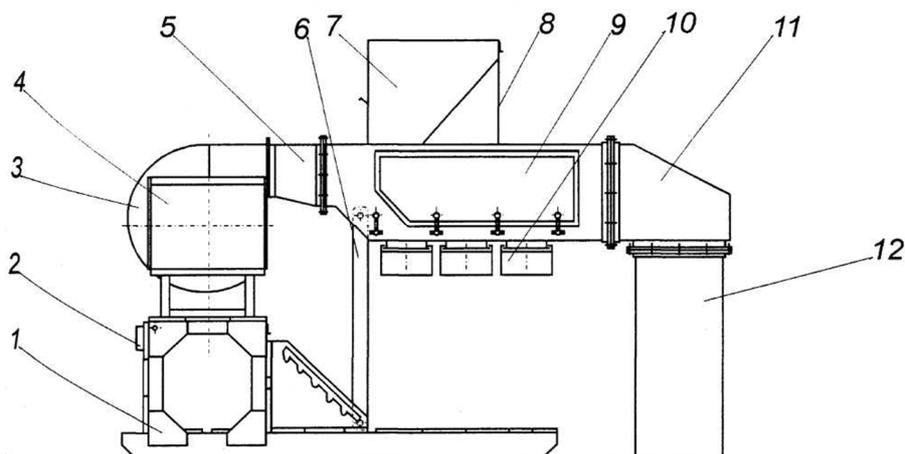


Рис. 1. Макетный образец пневмосепаратора УПС-500: 1 – рама; 2 – пульт управления; 3 – вентилятор радиальный; 4 – шибер; 5 – переходник; 6 – рамка регулировочная; 7 – бункер; 8 – упор; 9 – камера воздушная; 10 – ёмкость; 11 – колено; 12 – фильтр

Результаты и их обсуждение

Выход материала в первую фракцию с увеличением скорости воздушного потока уменьшается с 97,83 до 86,01%. График выхода материала (рис. 2, а) в этом случае аппроксимируется следующим уравнением:

$$B = 73,753 + 15,214 \cdot V - 2,407 \cdot V^2. \quad (1)$$

Степень достоверности полученной эмпирической зависимости подтверждается высоким значением коэффициента корреляции: $r = 0,963$.

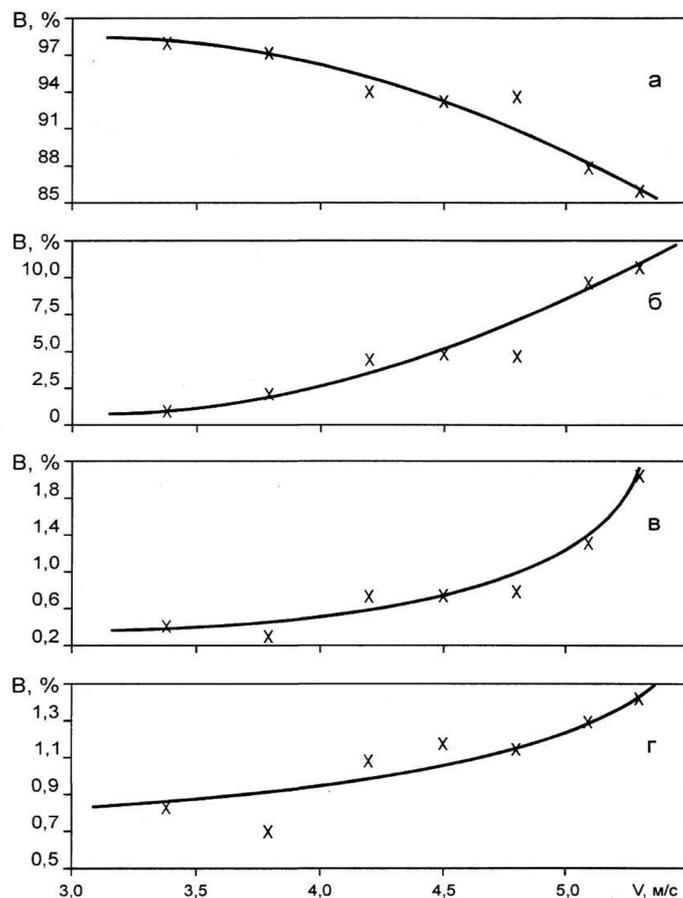


Рис. 2. Выход фракций в зависимости от скорости воздушного потока: а, б, в, г – соответственно выход 1, 2, 3, 4

Выход материала во вторую фракцию изменялся от 0,93 до 10,57%, кривая изменения выхода материала от скорости воздушного потока (рис. 2, б) аппроксимируется следующим уравнением:

$$B = 0,035 \cdot e^{1,081 \cdot V}. \quad (2)$$

Степень достоверности полученной зависимости подтверждается коэффициентом корреляции $r = 0,965$.

В третьей фракции количество поступившего материала колебалось от 0,40 до 2,02%. Экспериментальная зависимость выхода семян в этом случае (рис. 2, в) представляется формулой

$$B = \frac{1}{7,079 - 1,242 \cdot V}. \quad (3)$$

Степень достоверности полученной зависимости подтверждается высоким коэффициентом корреляции: $r = 0,984$. В четвертую фракцию (отход) попадают в основном примеси, при этом выход её составлял от 0,84 до 1,40%, а экспериментальная зависимость выхода этой фракции имеет вид

$$B = 80,602 \cdot V^{(-12,922/V)}. \quad (4)$$

Степень достоверности полученной зависимости подтверждается коэффициентом корреляции $r = 0,914$.

Содержание семян в четвертой фракции (рис. 2, г) не превышало 0,4% на всех режимах испытания сепаратора. Причём в неё попадают малоценные семена с малой индивидуальной массой. Так, масса 1000 шт. семян в четвертой фракции колебалась от 20,90 до 34,11 г.

Таким образом, можно сделать вывод, что с увеличением скорости воздушного потока выход материала в первую фракцию падает, но увеличивается в остальных фракциях. Полученные данные имеют высокую степень корреляции, и коэффициент корреляции для первых трёх фракций равен 0,96–0,98, а для четвертой – 0,91.

С увеличением скорости воздушного потока чистота семян сначала растёт, а при скорости воздушного потока более 4,2 м/с она существенно не изменяется и остаётся на уровне 99,43–99,71%, что соответствует первому классу ГОСТа на семена. Масса 1000 шт. семян в первой фракции с увеличением скорости воздушного потока имеет тенденцию к возрастанию, вследствие чего семена, попавшие во вторую и третью фракции, направляют на кормовые цели или на повторную обработку (рис. 3).

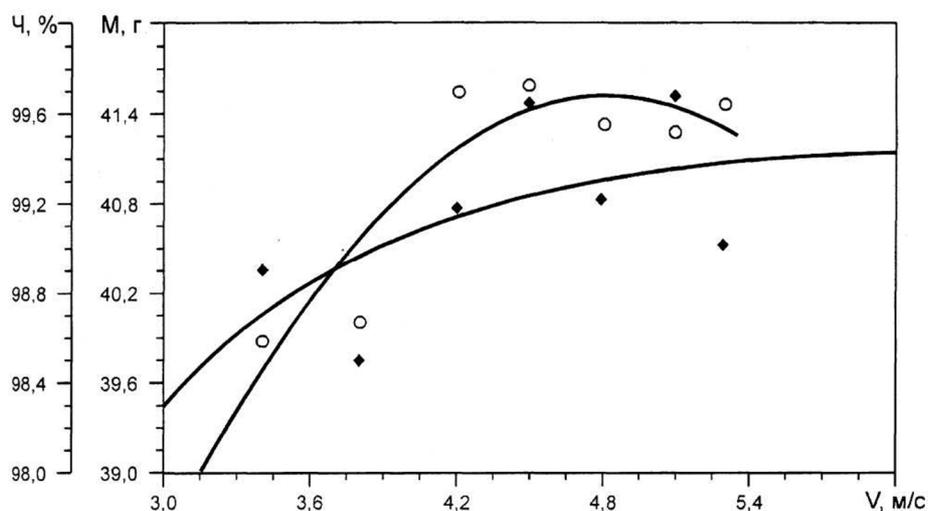


Рис. 3. Зависимость чистоты (Ч, ○) и массы 1000 семян (М, ♦) в первой фракции от скорости воздушного потока

Таким образом, учитывая, что в первую очередь надо выделить фракцию, содержащую наибольшее количество материала, имеющего высокую чистоту и массу 1000 шт. семян и с наименьшими потерями семян в отход, следует сделать вывод, что этим требованиям удовлетворяет скорость воздушного потока, равная 4,2–4,8 м/с. В этом случае в первую фракцию выделяется 93,33–93,74% материала с массой 1000 шт. семян 40,75–41,42 г и чистотой 99,51–99,71%, а потери семян составят 0,07–0,13% при массе 1000 шт. семян 28,28–30,18 г.

Чистота семян во всем диапазоне изменения производительности сепаратора (до 1006 кг/ч) остаётся достаточно высокой (свыше 99,0%).

Выход материала во вторую фракцию при увеличении его подачи в сепаратор сначала растёт с 6,47 до 14,31% с ростом производительности до 275 кг/ч. При дальнейшем увеличении производительности выход материала стабилизируется и колеблется около 17%. Примерно такая же тенденция прослеживается по количеству поступившего материала в третью фракцию, но само количество материала в этой фракции не превышает 2,69%.

В четвёртую фракцию (отход) поступает ещё меньше материала (от 1,06 до 1,42%), и она содержит в основном примеси. Количество семян, попавших в неё при всех значениях производительности сепаратора, не превышает 0,5% при массе 1000 шт. семян от 28,74 до 33,25 г (рис. 4). При производительности сепаратора от 300 до 1006 кг/ч получены близкие качественные показатели его работы, и на всём этом диапазоне он может работать эффективно.

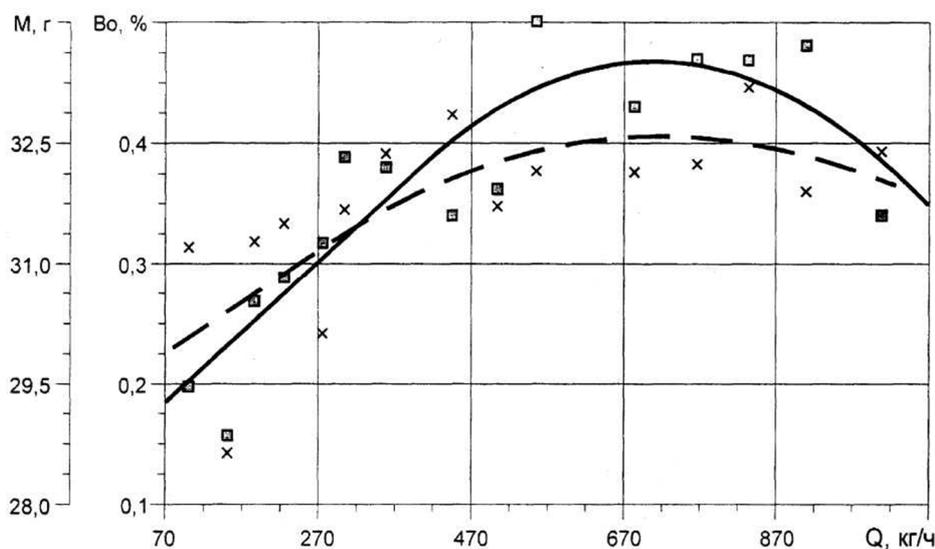


Рис. 4. Изменение количества основной культуры к содержанию в исходном материале (Bo, ■) и массы 1000 семян (M, x) в четвёртой фракции в зависимости от производительности сепаратора

В процессе обработки зернового материала всегда стремятся получить в первой фракции максимальное количество высококлассных семян. Обычно в первую фракцию удаётся выделить около 80% таких семян, во вторую фракцию – до 17% зернового материала, в третью – не более 2,7% и с низкой чистотой (не выше 70%). В четвёртую фракцию (отход) поступает до 1,5% материала с содержанием семян в нём не более 0,5% и с малой массой 1000 шт. семян, а значит, наибольший интерес представляет вторая фракция, содержащая значительное количество семян.

Состав примесей различается по фракциям (рис. 5). Так, в первую фракцию в основном выделяются битые и щуплые семена при незначительном (менее 0,5%) попадании органических примесей, при этом наблюдается увеличение количества щуплых семян с ростом угла наклона камеры.

Во второй фракции содержание примесей резко возрастает, и они в основном состоят из прохода через решето с продолговатыми отверстиями – 1,7 мм и органических примесей, наибольшее количество которых выделяется при углах наклона камеры, близких к 15°. Содержание прохода через решето 1,7 мм увеличивается до 11,0%, а органических примесей – до 7,0%. Содержание дроблёных семян колеблется от 1,0 до 3,3%.

В третьей фракции преобладает содержание органических примесей, причём наибольшее их количество выделяется при углах наклона камеры 10–14° (34,94–46,74%). Содержание прохода через решето 1,7 мм не превышает 20%, а дроблёных семян – 2,44%.

В четвёртую фракцию (отход) в основном выделяются органические примеси – их содержание на лучших режимах (угол наклона камеры 7,5–18°) достигает 81,87–89,52%. Количество дроблёных семян в этой фракции в основном не превышает 1,0%, а проход через решето 1,7 мм – 0,6%.

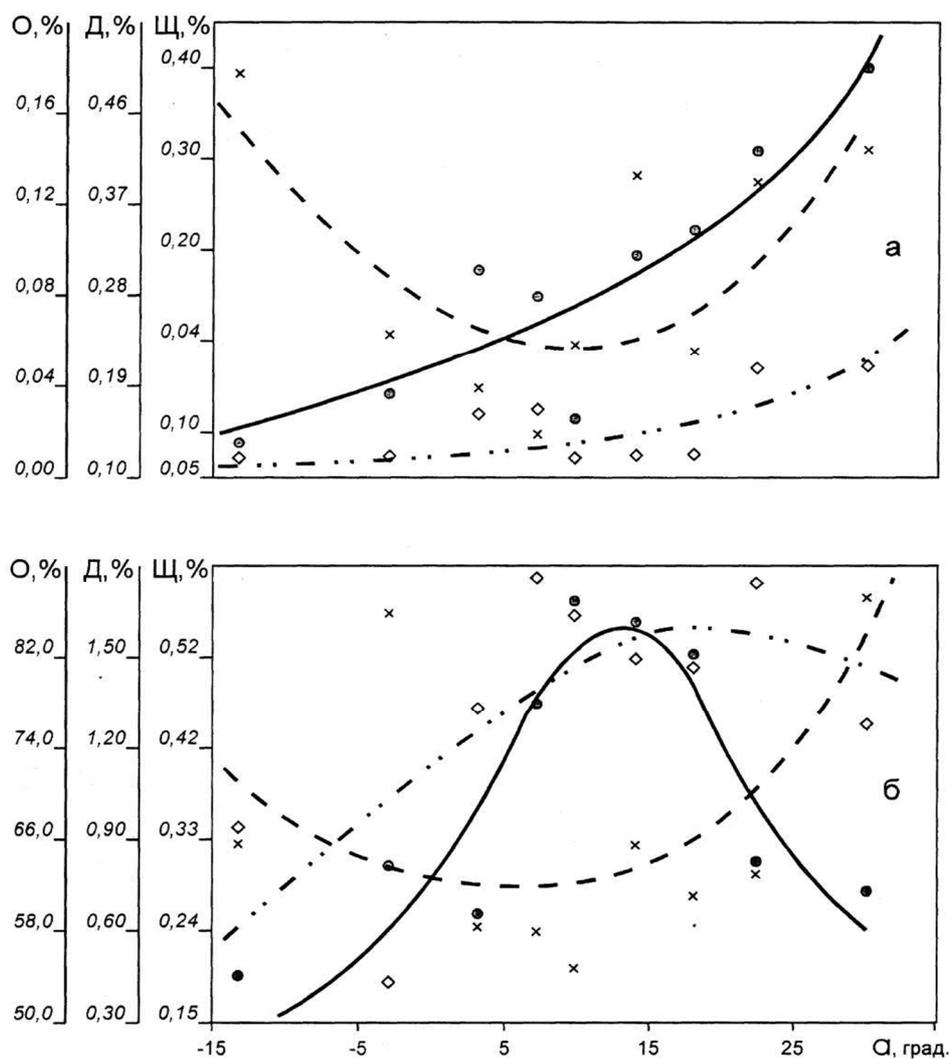


Рис. 5. Содержание щуплых (Щ, ○), дроблёных (Д, ×) семян и органической примеси (О, ◇) во фракциях в зависимости от угла наклона воздушной камеры: а – 1-я фракция, б – 4-я фракция

В процессе проведения экспериментальных исследований было установлено, что на процесс сепарации в горизонтальном пневмоканале влияет глубина канала. Для исследуемого макетного образца УПС-500 оптимальный диапазон глубины канала составляет 340–360 мм.

При разделении семенного материала в пневмосепараторах с горизонтальным каналом выход материала по фракциям может колебаться в больших диапазонах в зависимости от физико-механических свойств исходного материала, а также от технологических и конструктивных параметров сепаратора. Причём при одних и тех же значениях конструктивных параметров изменение, например, производительности сепаратора оказывает существенное влияние на выход материала по фракциям и на содержание в них примесей. Учитывая результаты проведённых исследований, можно рекомендовать выбирать параметры процесса сепарации, при которых в первую фракцию выделяется максимальное количество семян, не требующих дальнейшей доработки, а количество зернового материала, поступающего во вторую и третью фракции, не должно превышать 20%.

Выводы

1. Проведённые исследования показали, что сепарация зернового материала в горизонтальном или наклонном воздушных потоках имеет ряд преимуществ. Из исходного материала могут быть одновременно выделены примеси с меньшей и большей критической скоростью, чем у основного материала. В сепараторах с горизонтальным или наклонным воздушными потоками, если материал подавать тонким слоем, почти исключается взаимное воздействие друг на друга частиц с различными критическими скоростями, чего в вертикальном воздушном потоке добиться трудно.

2. На основании экспериментальных исследований макетного образца универсального пневмосепаратора, разделяющего исходный материал на 4 фракции (4-я фракция – отход), определены основные оптимальные параметры пневмосепаратора с горизонтальным воздушным потоком:

- производительность – 300–1000 кг/ч. Величина выхода при этом в первую фракцию составляла 80–90% при засорённости семян не более 0,5%;
- скорость воздушного потока в сепараторе должна составлять 4,2–4,8 м/с;
- оптимальный угол наклона воздушной камеры к горизонту – $-2,5 - +10^\circ$.

3. На процесс сепарации в горизонтальном канале существенное влияние оказывает глубина канала. В процессе экспериментов получен оптимальный диапазон глубины канала – 340–360 мм.

4. Обоснованные параметры горизонтального пневмосепаратора удовлетворяют требованиям обработки нескольких тысяч партий семян массой до 20–30 кг, а также нескольких партий семян (2–4) массой до нескольких десятков тонн в условиях небольших крестьянских хозяйств.

Библиографический список

1. Анискин В.И. Классификация пневмосепараторов зерновых материалов / В.И. Анискин, В.М. Дринча // Достижения науки и техники АПК. – 1993. – № 4. – С. 22–23.
2. ГОСТ Р 52325-2005. Семена сельскохозяйственных растений. Сортовые и посевные качества. Общие технические условия – Введ. 2006–01–01. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 20 с.
3. Емельянов П.А. Экспериментальные исследования разделения зерна в сепараторе с горизонтальным воздушным потоком / П.А. Емельянов, А.В. Коновалов, Н.В. Адаев // Нива Поволжья. – 2010. – № 2. – С. 45–48.
4. Зюлин А.Н. Фракционные технологии очистки семян зерновых / А.Н. Зюлин, В.М. Дринча, С.С. Ямпиллов // Земледелие. – 1998. – № 6. – С. 39.
5. Малис А.Я. Машины для очистки зерна воздушным потоком / А.Я. Малис, А.Р. Демидов. – Москва : Машгиз, 1962. – 176 с.
6. Матвеев А.С. Сепарирование зерновой смеси вертикальным воздушным потоком / А.С. Матвеев // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1969. – № 11. – С. 17–19.
7. Нелюбов А.И. Пневмосепарирующие системы сельскохозяйственных машин / А.И. Нелюбов, Е.Ф. Ветров. – Москва : Машиностроение, 1977. – 190 с.
8. Gorial B. Aerodynamic properties of grain/straw materials / B. Gorial, J. O'Callaghan // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1990. – Vol. 46. – Pp. 275–290.
9. Schneider H. Harvesting special crops : Physical properties and settings / H. Schneider, M. Straub, P. Wacker // An ASAE Meeting Presentation. – ASAE, 2001. – Paper 01-6104. – 13 p.
10. Wacker P. Influence on the composition of grain-chaff mixtures of the combine harvester / P. Wacker, S. Tagungsband // VDI / MEG-Tagung Landtechnik Hohenheim. – 1994. – 35.1–35.3.
11. Yuanguo Z., Wacker P., Kutzbach H.D. Investigation on winnowing steps in the combine harvester / Z. Yuanguo, P. Wacker, H.D. Kutzbach // Proceeding of 99 International Conference on Agricultural Engineering. – Beijing, China, December, 1999. – Pp. 225–231.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Василий Михайлович Дринча – доктор технических наук, профессор кафедры технологических систем АПК ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», Россия, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, e-mail: vdrincha@list.ru.

Александр Семенович Филатов – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры энергообеспечения в АПК ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», Россия, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, e-mail: filatov.a.c@mail.ru.

Дата поступления в редакцию 12.03.2021

Дата принятия к печати 28.04.2021

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Vasily M. Drincha, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Dept. of Technological Systems in Agro-Industrial Complex, Arctic State Agrotechnological University, Russia, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, e-mail: vdrincha@list.ru.

Alexander S. Filatov, Candidate of Agricultural Sciences, Docent, Dept. of Energy Conservation in Agro-Industrial Complex, Arctic State Agrotechnological University, Russia, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, e-mail: filatov.a.c@mail.ru.

Received March 12, 2021

Accepted after revision April 28, 2021