

ПРОЦЕССЫ, АППАРАТЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

УДК 664.726.9

ВЛИЯНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИБРОПНЕВМОСЕПАРАТОРА ДЛЯ ОЧИСТКИ РЖИ ОТ СПОРЫНЬИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО РАБОТЫ

А.В. Иванов, В.М. Поздняков, Ж.В. Кошак

В работе описывается разработанный вибропневмосепаратор для очистки ржи от спорыньи с принципиально новыми конструктивными решениями, позволяющий значительно повысить степень очистки и при этом сократить потери годного зерна с примесями. Приводятся результаты исследований по определению оптимальных кинематических и конструктивных параметров работы вибропневмосепаратора, обеспечивающих максимальную степень очистки и производительность.

Введение

Зерновое производство в нашей стране традиционно является основной и наиболее значимой отраслью сельского хозяйства, от развития которой в значительной мере зависит обеспеченность населения продуктами питания, его жизненный уровень. Важнейшим звеном в единой технологической цепочке зернового производства является послеуборочная обработка и хранение зерна. Анализ работы зерноперерабатывающих предприятий нашей Республики позволяет судить о массовом распространении и развитии спорыньи. Спорынья содержит вредные для организма людей и животных вещества – эрготоксины. Мука из зерна с примесью спорыньи более 0,05% непригодна для выпечки хлеба, а зерно с содержанием спорыньи более 0,5% – для скармливания животным [1]. Повышение количества спорыньи снижает долю продовольственного зерна группы «А» и одновременно повышает количество зерна технического назначения группы «Б», что приводит к значительным материальным потерям для сельскохозяйственных предприятий в связи с более низкой закупочной стоимостью зерна группы «Б». Проведенный анализ существующего оборудования показывает, что на данный момент в нашей Республике не существует достаточно эффективного оборудования, позволяющего выделять такие трудноотделимые примеси как спорынья. Поэтому разработка конструкции новой отечественной машины для выделения спорыньи – необходимый этап в процессе совершенствования технологии очистки зерна и подготовки семенного материала.

Результаты исследований и их обсуждение

Основной проблемой выделения спорыньи из ржи является то, что размеры спорыньи находится в достаточно широких пределах. На ситовых сепараторах и триерах выделяется крупная и мелкая фракция спорыньи. Средняя же фракция, геометрические характеристики

которой близки к характеристикам ржи, остаётся в зерновой массе.

В настоящее время зарубежными изготовителями зерноочистительного оборудования для очистки ржи от рожков спорыньи предлагается применять фотоэлектронные сепараторы, использующие различия по цвету зерновок ржи и рожков спорыньи. Однако высокая стоимость, сложность технического обслуживания и настроек под конкретную партию зерна умоляют эффект сепарирования и делают данный тип машин для большинства отечественных зерноперерабатывающих предприятий недоступными. Исходя из этого, наиболее эффективное разделение зерновой массы и спорыньи на наш взгляд можно проводить по различиям в плотности рожков спорыньи и зерновок ржи на машинах вибропневматического принципа действия. Попытки создания вибропневмосепаратора для очистки ржи от спорыньи предпринимались и ранее, однако при этом в отходы уходило до 30% годного зерна, что делало использование данных машин экономически нецелесообразным.

Нами ведутся исследования по разработке технологий и оборудования для выделения спорыньи из ржи. Одним из направлений является разделение ржи и рожков спорыньи по различию плотностей. Знание плотности компонентов зерновой массы, в том числе и рожков спорыньи, позволит наиболее эффективно проводить очистку ржи. Доверительные интервалы по плотности компонентов, составляющих зерновую массу, приводятся в таблице 1 [2].

Таблица 1– Интервалы изменения плотности

| Компоненты | Интервал варьирования плотности, г/см ³ |
|------------------|---|
| Рожь | 1,20–1,30 |
| Спорынья крупная | 1,050–1,20 |
| Спорынья средняя | 1,08–1,15 |
| Спорынья мелкая | 1,0–1,10 |

Данные, приведенные в таблице 1, свидетельствуют о возможном эффективном разделении зерновок ржи и рожков спорыньи по плотности.

Наиболее эффективным оборудованием для разделения сыпучей смеси по плотности являются машины, работающие по вибропневматическому принципу действия. Явления, происходящие в аэрируемом потоке зерновой смеси на вибрирующей шероховатой поверхности деки, совершающей поступательно-возвратные колебания, очень сложны. Объяснить это можно многочисленными связями движущихся частиц, взаимодействующих друг с другом, с воздушным потоком и с поверхностями, ограничивающими поток. Кроме того, изучение поведения сыпучей смеси, находящейся в состоянии псевдооживления на вибрирующей шероховатой поверхности, осложняет многообразие факторов, влияющих на данный процесс: угол наклона сетчатой деки, направление действия добавочной силы от электровибраторов, амплитуда колебаний, нагрузка на сетчатую деку, длина ситовой поверхности, равномерность распределения скоростей воздушного потока, частота колебаний сетчатой деки. Для изучения влияния кинематических и конструктивных параметров работы вибропневмосепаратора на эффективность разделения двухкомпонентной сыпучей смеси рожь-спорынья был разработан экспериментальный вибропневмосепаратор (рисунок 1).

На начальном этапе проектирования лабораторного вибропневмосепаратора с принципиально новыми конструктивными решениями рабочих узлов была разработана компьютерная трёхмерная модель вибропневмосепаратора. Создание трёхмерной модели позволило произвести на компьютере раннее диагностирование таких проблем, как неправильные размеры, пересечения деталей, недоступные для обслуживания компоненты, узлы, которые невозможно собрать. Всё это значительно сократило время проектирования и уменьшило его стоимость [3–4].

Конструкция экспериментального вибропневмосепаратора позволяет регулировать следующие основные параметры: угол наклона сетчатой деки, направление действия добавочной силы от электровибраторов, амплитуду и частоту колебаний сетчатой деки, подачу про-

дукта на сетчатую деку.

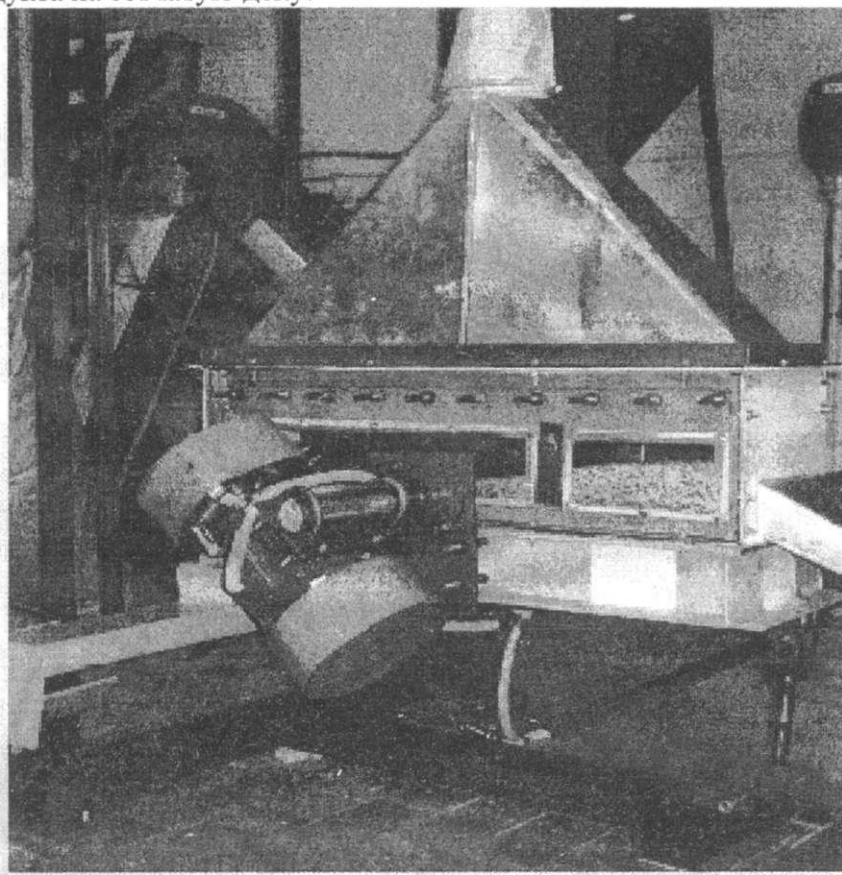


Рисунок 1 – Экспериментальный вибропневмосепаратор для разделения сыпучих продуктов по плотности

Частота колебаний регулируется при помощи частотного преобразователя тока в цепи питания электродвигателей. Регулировка угла наклона сетчатой деки относительно горизонта осуществляется при помощи передней стойки, имеющей на концах резьбу. Регулировка добавочной силы от работы электровибраторов осуществляется поворотом электродвигателей с дебалансами относительно оси их крепления. Контроль угла наклона сетчатой деки к горизонту и угла вибраторов осуществляется при помощи оптического угломера ОУМ-3. На элементы модернизации экспериментального вибропневмосепаратора поданы 7 заявок на получение патентов на изобретение.

Для определения оптимальных кинематических и конструктивных параметров работы экспериментального вибропневмосепаратора был спланирован и проведен многофакторный эксперимент по плану Бокса-Уилсона 2^4 + звезда. Факторами варьирования в интервалах выбраны: угол наклона сетчатой деки ($A = 2-5^\circ$), направление действия добавочной силы от электровибраторов ($B = 42-50^\circ$), разряжение внутри вибропневмосепаратора ($H=38-46$ мм вод.ст.) и частота вращения электровибраторов ($n=900-1400$ об/мин). В качестве выходной функции были исследованы такие показатели, характеризующие эффективность работы вибропневмосепаратора, как степень очистки ржи от рожков спорыньи $C, \%$ и производительность Π , кг/ч. При проведении эксперимента создавалась зерновая смесь с заданной концентрацией спорыньи 1%, что имитировало некондиционную по содержанию спорыньи рожь. В таблице 2 представлена матрица и результаты эксперимента по определению оптимальных кинематических и конструктивных параметров работы лабораторного вибропневмосепаратора.

На основании полученных экспериментальных данных при помощи статистического пакета программ STATGRAPHICS Plus были получены графические и математические зависимости, позволяющие оценить влияние входных факторов на выходную функцию. В ходе проведения эксперимента выходными параметрами являлись степень очистки $C, \%$ и производительность вибропневмосепаратора Π , кг/ч. Критерием оптимизации при проведении эксперимента являлась максимальная степень очистки C , при обеспечении максимальной производительности Π . Ввиду того, что зависимость выходных функций от входных параметров довольно сложна, то наиболее целесообразно проводить оценку влияния входных параметров на каждую из функций по отдельности.

Для графического описания влияния кинематических и конструктивных параметров работы экспериментального вибропневмосепаратора был построен ряд графических зависимо-

стей. На рисунке 2 представлена экспериментальная карта Парето.

Таблица 2 – Матрица и результаты эксперимента

| № опыта | Входные параметры | | | | Выходные параметры | |
|---------|------------------------------------|---------------------------------|--|-----------------------------------|----------------------|----------------------------|
| | Угол наклона сетчатой деки А, град | Угол наклона вибраторов В, град | Частота вращения электровибраторов n, об/мин | Избыточное давление Н, мм вод.ст. | Степень очистки С, % | Производительность П, кг/ч |
| 1 | 3,5 | 46 | 1150 | 42 | 92,2 | 55,1 |
| 2 | 2 | 42 | 900 | 38 | 81,6 | 104,66 |
| 3 | 5 | 42 | 900 | 38 | 90,2 | 21,32 |
| 4 | 2 | 50 | 900 | 38 | 73,3 | 135,92 |
| 5 | 5 | 50 | 900 | 38 | 85,5 | 59,65 |
| 6 | 2 | 42 | 1400 | 38 | 86,5 | 60,61 |
| 7 | 5 | 42 | 1400 | 38 | 90,05 | 24,31 |
| 8 | 2 | 50 | 1400 | 38 | 73,07 | 133,44 |
| 9 | 5 | 50 | 1400 | 38 | 85,2 | 41,43 |
| 10 | 2 | 42 | 900 | 46 | 93,05 | 65,54 |
| 11 | 5 | 42 | 900 | 46 | 90,29 | 26,08 |
| 12 | 2 | 50 | 900 | 46 | 90,9 | 92,6 |
| 13 | 5 | 50 | 900 | 46 | 91,7 | 69,3 |
| 14 | 2 | 42 | 1400 | 46 | 92,98 | 60,86 |
| 15 | 5 | 42 | 1400 | 46 | 90,18 | 12,46 |
| 16 | 2 | 50 | 1400 | 46 | 90,8 | 76,93 |
| 17 | 5 | 50 | 1400 | 46 | 91,6 | 69,03 |
| 18 | 0,5 | 46 | 1150 | 42 | 74,3 | 128,2 |
| 19 | 6,5 | 46 | 1150 | 42 | 83,7 | 16,2 |
| 20 | 3,5 | 38 | 1150 | 42 | 89,26 | 46,08 |
| 21 | 3,5 | 54 | 1150 | 42 | 82,3 | 80,84 |
| 22 | 3,5 | 46 | 650 | 42 | ----- | ----- |
| 23 | 3,5 | 46 | 1650 | 42 | 97,6 | 45,27 |
| 24 | 3,5 | 46 | 1150 | 34 | 76,4 | 166,77 |
| 25 | 3,5 | 46 | 1150 | 50 | 94,1 | 21,87 |
| 26 | 3,5 | 46 | 1150 | 42 | 92,2 | 54,71 |

Карта Парето

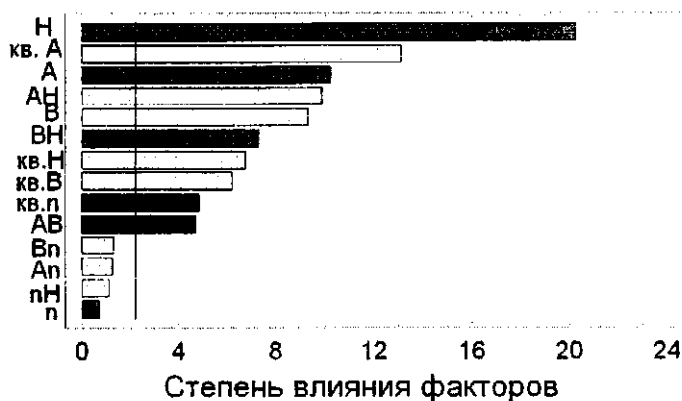


Рисунок 2 – Степень влияние входных параметров на степень очистки

Карта Парето показывает значимость коэффициентов математической модели и как следствие силу влияния факторов на изучаемый процесс. Наибольшее влияние на степень очистки ржи от спорыньи оказывает фактор Н (разряжения внутри вибропневмосепаратора). С ростом значения данного фактора сила влияния на степень очистки С будет возрастать, числовое значение коэффициента при Н в математической модели наибольшее. На втором месте по силе влияния находится квадрат

фактора А (угол наклона сетчатой деки к горизонту). С ростом значения фактора сила влияния на параметр оптимизации С, т.е. на степень очистки, убывает. Наименьшее влияние на процесс очистки ржи от спорыньи оказывает частота вращения электровибраторов n.

Сочетание таких факторов как частота вращения электровибраторов n и избыточного давления H , угла наклона сетчатой деки A и частоты вращения электровибраторов n , угла наклона вибраторов B и частоты вращения электровибраторов n оказывают незначительное влияние на степень очистки ржи от спорыньи (кривые на карте Парето не пересекают линию значимости). На рисунке 3 представлена графическая зависимость степени очистки $C, \%$ от величины угла сетчатой деки A и угла наклона вибраторов B при частоте вращения электровибраторов $n=1150$ об/мин и избыточном давлении $H=42$ мм вод.ст.

Данная поверхность показывает, как изменяется степень очистки ржи от спорыньи в процессе вибропневмосепарирования при изменении угла наклона сетчатой деки A от 2° до 5° и от 42° до 50° . Полученная поверхность имеет явный максимум, что свидетельствует о том, что процесс стабилизировался и граничные условия интервалов изменения факторов для проведения эксперимента определены верно. На рисунке 4 представлены линии равных уровней для поверхности отклика.

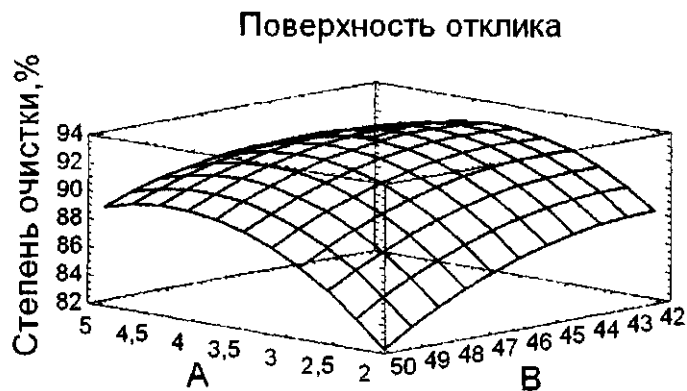


Рисунок 3 – Графическая зависимость степени очистки $C, \%$ от величины угла сетчатой деки A и направления действия добавочной силы B

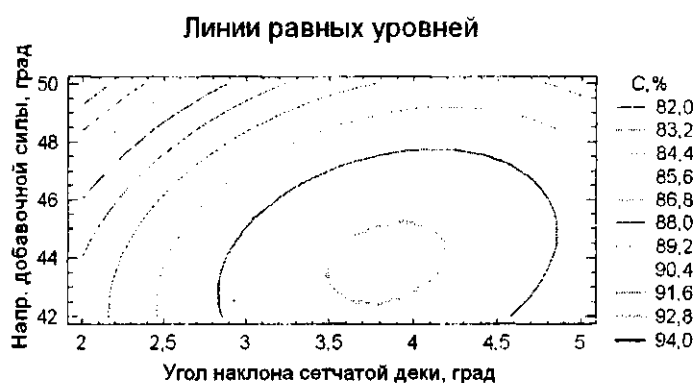


Рисунок 4 – Линии равных уровней для поверхности отклика

Зависимость, представленная рисунком 4, отображает области, каждой из которой соответствует различная величина степени очистки. Область, которой соответствует максимальная степень очистки, проецируется в замкнутый контур. Данный контур определяет наиболее оптимальные параметры работы вибропневмосепаратора с точки зрения обеспечения максимальной степени очистки. В области, обозначенной данным контуром, степень очистки максимальна и составляет $C=92,8\%$, однако производительность в каждой точке различна.

Для получения общего оптимума работы вибропневмосепаратора (обеспечение максимальной степени очистки при максимальной производительности) необходимо проанализировать изменение производительности в данной области.

Используя полученное уравнение, с помощью пакета программ STATGRAPHICS Plus, были выбраны оптимальные режимы вибропневмосепарирования с точки зрения обеспечения максимальной степени очистки. Для разделения двухкомпонентной сыпучей смеси рожь – спорынья, с процентным содержанием спорыньи в исходной смеси 1% , на экспериментальном вибропневмосепараторе наиболее оптимальными параметрами работы с точки зрения обеспечения максимальной степени очистки являются: угол наклона сетчатой деки к горизонту $A=3,1^\circ$, направление действия добавочной силы от электровибраторов $B=44,9^\circ$, частота вращения электровибраторов $n=1650$ об/мин, избыточное давление $H=46,6$ мм вод.ст. Предполагаемая степень очистки при данных кинематических параметрах работы составляет $98,7\%$.

Для графического и математического описания влияния кинематических и конструктивных параметров работы экспериментального вибропневмосепаратора на его производительность был построен ряд графических зависимостей. На рисунке 5 представлена экспериментальная карта Парето.

Карта Парето

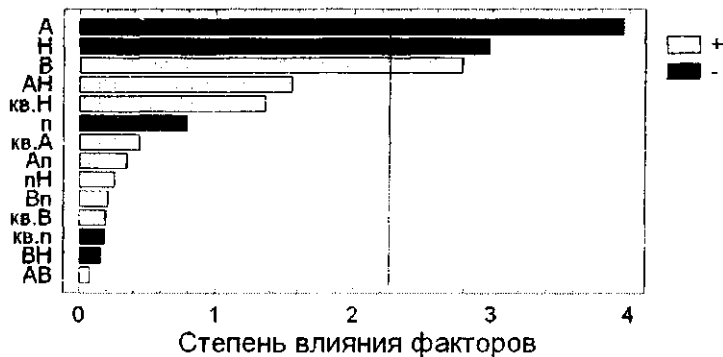


Рисунок 5 - Степень влияния входных параметров на производительность экспериментального вибропневмосепаратора

Из графика, представленного на рисунке 5, видно, что наибольшее влияние на производительность экспериментального вибропневмосепаратора оказывает фактор А (угол наклона сетчатой деки к горизонту). Увеличение данного фактора приводит к уменьшению производительности П. На втором месте по силе влияния находится фактор Н. При увеличении данного фактора производительность уменьшается. Значительное влияние на производительность также оказывает направление действия добавочной силы от электровибраторов В.

Увеличение данного фактора (в пределах экспериментального диапазона) приводит к повышению производительности вибропневмосепаратора. Влияние на производительность такого фактора как частота вращения электровибраторов n незначительно (не пересекает линию значимости). На рисунке 6 представлена графическая зависимость производительности экспериментального вибропневмосепаратора от величины угла сетчатой деки А и направления действия добавочной силы от электровибраторов В при частоте вращения электровибраторов $n=1150$ об/мин и избыточном давлении $H=42$ мм вод.ст.

Представленная на графике поверхность в диапазоне проведения эксперимента возрастает и имеет максимальное значение при угле наклона сетчатой деки $A=2^\circ$ и направлении действия добавочной силы от электровибраторов $B=50^\circ$. На основании полученных экспериментальных данных были определены кинематические и конструктивные параметры работы экспериментального вибропневмосепаратора, обеспечивающие максимальную производительность. Наиболее оптимальными кинематическими параметрами работы с точки зрения обеспечения максимальной производительности являются: угол наклона

сетчатой деки к горизонту $A=0,5^\circ$, направление действия добавочной силы от электровибраторов $B=53,9^\circ$, частота вращения электровибраторов $n=978$ об/мин, избыточное давление $H=34,0$ мм вод.ст. Предполагаемая производительность лабораторного вибропневмосепаратора при данных параметрах работы составляет 277 кг/ч. Лабораторный вибропневмосепаратор поддается физическому моделированию. При этом производительность промышленного модернизированного вибропневмосепаратора с площадью ситовой поверхности, равной площади машин аналогичного принципа действия, будет равняться 4–5 т/ч.

На основании полученных экспериментальных данных были получены математические

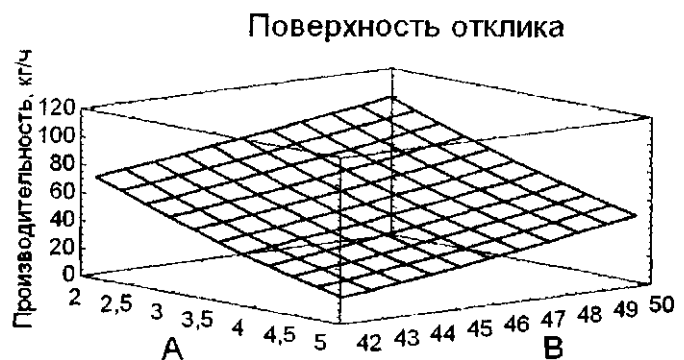


Рисунок 6 – Графическая зависимость производительности П, кг/ч от величины угла сетчатой деки А и направления действия добавочной силы от электровибраторов В

зависимости, позволяющие прогнозировать степень очистки C и производительность P при изменении кинематических и конструктивных параметров работы вибропневмосепаратора.

Полученные зависимости для определения и прогнозирования (1),(2):

- степень очистки ржи от спорыньи на экспериментальном вибропневмосепараторе:

$$C = -149,68 + 20,912A + 3,172B - 0,022n + 6,304H - 1,439A^2 + 0,201AB - 0,00086An - 0,421AH - 0,0964B^2 - 0,00033Bn + 0,116BH + 0,000023n^2 - 0,00029nH - 0,105H^2; \quad (1)$$

- производительность экспериментального вибропневмосепаратора:

$$P = 1622,21 - 113,547A - 2,705B - 0,127n - 56,608H + 1,577A^2 + 0,083AB + 0,006An + 1,761AH + 0,0014Bn - 0,06BH - 0,000023n + 0,0017nH + 0,563H^2. \quad (2)$$

Полученные математические модели были проверены на адекватность реальному процессу при помощи критерия Фишера.

Знание зависимости производительности и степени очистки вибропневмосепаратора от его кинематических и конструктивных параметров позволяет оптимизировать его работу. В ходе эксперимента по разделению двухкомпонентной сыпучей смеси рожь – спорынья, с процентным содержанием спорыньи в исходной смеси 1%, были получены оптимальные кинематические и конструктивные параметры работы экспериментального вибропневмосепаратора, при которых степень очистки достигает 96% за один проход при количестве годного зерна во фракции примесей не более 3,5% от поступившей на сепарирование зерновой массы. При этом некондиционная рожь, с содержанием спорыньи 1%, после очистки перешла в разряд продовольственной, с содержанием спорыньи 0,055%. Повторная очистка на экспериментальном вибропневмосепараторе обеспечивает доведение ржи по содержанию спорыньи до помольных кондиций практически на всех режимах. Общие потери годного зерна в данном случае составляют не более 5% от исходной зерновой массы.

Результаты исследований показывают, что экономический эффект от внедрения разработанного вибропневмосепаратора производительностью 5 т/ч при восьмичасовом рабочем дне и 22-х рабочих днях в месяц составит 35 млн рублей в месяц за счёт перевода ржи из категории фуражной в продовольственную.

Заключение

Разработан экспериментальный вибропневмосепаратор для очистки ржи от спорыньи, позволяющий значительно повысить эффективность очистки ржи от спорыньи и при этом снизить потери годного зерна с примесями. Определены оптимальные рабочие параметры экспериментального вибропневмосепаратора, обеспечивающие максимальную степень очистки и производительность. Получены аналитические зависимости степени очистки и производительности от кинематических и конструктивных параметров.

Литература

1. Гортинский В.В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях / В.В. Гортинский, А.Б. Демский, М.А. Борискин. – М.: Колос, 1980. – 303с.
2. Рукшан, Л.В., Спорынья / Л.В. Рукшан. – Минск: Издательский центр БГУ, 2003. – 213с.
3. Иванов, А.В. Повышение эффективности и снижение потерь годного зерна при выделении спорыньи из ржи / А.В. Иванов, В.М. Поздняков // VII Всероссийская конференция молодых учёных «Пищевые технологии» / УО «КГТУ». – Казань, 2007. – С. 120.
4. Поздняков, В.М. Модернизация вибропневмосепаратора для разделения спорыньи и ржи / Поздняков В.М., Иванов А.В // Техника и технология пищевых производств: тезисы докладов VI-й международной научно-технической конференции, Могилев, 22–23 мая 2007 г. / УО «МГУП». – Могилев, 2007. – С. 332–333.
5. ГОСТ 16990-88. Рожь. Требования при заготовках и поставках. – М.: Издательство стандартов, 1996. – 21 с.

Поступила в редакцию 28.05.2008