

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ВЫСЕВАЮЩИЕ СИСТЕМЫ
ПОСЕВНЫХ МАШИН:
ТЕОРИЯ, РАСЧЕТ, ЭКСПЕРИМЕНТ**

Минск
БГАТУ
2019

Авторы:

доктор технических наук, профессор *В. П. Чеботарев*,
кандидат технических наук, доцент *Н. Д. Лепешкин*,
кандидат технических наук, доцент *Ю. Л. Саланура*,
кандидат технических наук *Д. В. Зубенко*

Чеботарев, В. П. Пневматические высевальные системы посевных машин: теория, расчет, эксперимент / В. П. Чеботарев [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2019. – 224 с.: ил. – ISBN 978-985-25-0015-9.

В монографии изложены задачи, стоящие в области пневматических высевальных систем посевных машин; рассмотрены процессы, протекающие при распределении семян при посеве. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований технологического процесса работы вертикального и горизонтального распределителей семян, описана технология, конструкции и режимы работы различных посевных машин, результаты проведенных испытаний.

Для научных работников, преподавателей высших и средних специальных учебных заведений, аспирантов, магистрантов, студентов и инженерно-технических специалистов агропромышленного комплекса.

Рис. 103. Табл. 41. Библиогр.: 160 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Учреждения образования «Белорусский государственный
аграрный технический университет»
(протокол № 1 от 3 января 2019 г.)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
лаборатории обработки почвы и посева РУП «НПЦ НАН Беларуси
по механизации сельского хозяйства» *Л. Я. Степук*;
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
теоретической механики и теории механизмов и машин
УО «Белорусский государственный
аграрный технический университет» *А. Н. Орда*

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ..... | 6 |
| ВВЕДЕНИЕ | 9 |
| ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕХАНИЗАЦИИ ПОСЕВА СЕМЯН ЗЕРНОВЫХ И ЗЕРНОБОБОВЫХ КУЛЬТУР | |
| 1.1. Агротехнические требования к посеву зерновых культур и влияние равномерности распределения семян по площади поля на урожайность зерна | 12 |
| 1.2. Применяемые технологии, состояние и перспективы развития машин для посева семян в Республике Беларусь | 16 |
| 1.3. Основные типы сеялок и их высевальных систем | 22 |
| 1.4. Технологический процесс работы распределительно- транспортирующих устройств высевальных систем, их классификация и направления совершенствования..... | 30 |
| 1.5. Технологические схемы и элементы пневматических систем высева | 43 |
| ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВЫСЕВА ПОСЕВНОГО МАТЕРИАЛА | |
| 2.1. Аэродинамические основы пневматического транспортирования материала | 56 |
| 2.2. Анализ движения частицы посевного материала в отводе распределительного устройства пневматической системы высева | 59 |
| 2.3. Обоснование формы и конструктивных параметров вертикальной турбулизирующей вставки | 66 |
| 2.4. Анализ движения посевного материала в горизонтальной турбулизирующей вставке..... | 71 |
| 2.5. Процесс движения частицы посевного материала в вертикальной колонне распределительного устройства пневматической системы высева | 85 |
| 2.6. Обоснование основных конструктивных параметров направителя..... | 91 |
| 2.7. Определение аэродинамического сопротивления горизонтальной и вертикальной пневматических систем высева и расчет параметров вентилятора | 96 |

ГЛАВА 3. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВЫСЕВА СЕМЯН

| | |
|---|-----|
| 3.1. Программа исследований основных закономерностей технологического процесса пневматического высева семян | 109 |
| 3.2. Исследование конструктивных и технологических параметров пневматического высевающего аппарата вертикального типа | 111 |
| 3.2.1. Экспериментальная установка пневматического высевающего распределителя вертикального типа | 111 |
| 3.2.2. Проведение натурных испытаний | 115 |
| 3.2.3. Методика проведения лабораторных исследований экспериментального пневматического высевающего распределителя вертикального типа | 117 |
| 3.2.3.1. Методика определения физико-механических свойств посевного материала | 117 |
| 3.2.3.2. Методика обработки полученных экспериментальных данных | 119 |
| 3.3. Исследование конструктивных и технологических параметров пневматического высевающего аппарата горизонтального типа..... | 125 |
| 3.3.1. Экспериментальные установки для исследования рабочего процесса питателя и распределителя посевного материала..... | 125 |
| 3.3.2. Методика проведения лабораторных исследований..... | 128 |
| 3.3.2.1. Определение поперечной неравномерности высева | 129 |
| 3.3.2.2. Определение продольной неравномерности высева | 131 |
| 3.3.2.3. Проведение натурных испытаний | 131 |
| 3.3.2.4. Методика определения энергопотребления | 133 |
| 3.4. Анализ результатов экспериментальных исследований..... | 134 |
| 3.4.1. Априорное ранжирование факторов процесса | 134 |
| 3.4.2. Определение свойств посевного материала..... | 136 |
| 3.4.3. Определение поперечной неравномерности высева..... | 138 |
| 3.4.4. Натурные испытания пневматической системы высева с комбинированным распределительным устройством вертикального типа | 148 |

| | |
|--|------------|
| 3.4.5. Определение влияния параметров питателя эжекторного типа на его функциональные свойства | 151 |
| 3.4.6. Определение поперечной неравномерности высева | 159 |
| 3.4.7. Исследование продольной неравномерности высева..... | 167 |
| 3.4.8. Натурные испытания распределителя горизонтального типа | 173 |
| 3.4.9. Изучение энергоемкости процесса высева..... | 176 |
| ГЛАВА 4. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВО РАЗРАБОТАННЫХ ПОСЕВНЫХ МАШИН | |
| 4.1. Разработка и испытание экспериментального и опытного образца сеялки с пневматической системой высева | 178 |
| 4.2. Расчет экономической эффективности применения сеялки С-9 с пневматической системой высева | 185 |
| 4.3. Испытания почвообрабатывающе-посевных агрегатов АППА-6 и АППА-4 | 188 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 198 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 202 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ | 217 |

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

| | |
|--------------------|--|
| a | ширина междурядья, м |
| c_i | интервал между i -й парой соседних в ряду растений, м |
| d_q | эквивалентный диаметр частицы, м |
| g | ускорение свободного падения, м/с^2 |
| f | степень расширения первой ступени |
| f_1 | степень расширения второй ступени ($f_1 = F_3/F_2$) |
| $f_{\text{тр}}$ | коэффициент трения частицы |
| j | количество растений в рядке, шт. |
| k | показатель адиабаты (для воздуха $k = 1,4$) |
| k_c | безразмерный коэффициент сопротивления частицы воздушному потоку |
| $k_{\text{п}}$ | коэффициент парусности, м^{-1} |
| m | масса частицы, кг |
| m_1 | количество семяпроводов в сеялке, шт. |
| h | количество распределителей (вторая ступень), равное числу дозаторов, шт. |
| m_2 | количество семяпроводов, обслуживаемых одним дозатором, шт. |
| n_y | уточненная степень поджатия воздушного потока в конфузоре |
| s | коэффициент удельного падения давления, зависящий от формы, удельного веса, размеров и влажности материала, концентрации смеси, скорости воздуха, диаметра трубопровода |
| w | скорость семян, м/с |
| $w_{\text{вит}}$ | скорость витания частицы, м/с |
| $w_{\text{вп}}$ | скорость воздушного потока, м/с |
| $w_{\text{в}}$ | скорость воздуха в пневмоматериалопроводе, м/с |
| w_1, w_2 и w_3 | скорость воздушного потока в сечениях 1–1, 2–2 и 3–3 соответственно, м/с |
| $w_{\text{м}}$ | скорость материала в воздушном потоке, м/с |

Большие буквы латинского алфавита

| | |
|-----|--|
| A | площадь проекции частицы на плоскость, нормальную к потоку воздуха (миделево сечение), м^2 |
|-----|--|

| | |
|-----------------------|---|
| $C, C_0, C_1,$ | постоянные интегрирования или другие постоянные |
| $C_2, \dots C_n$ | эмпирические коэффициенты |
| D | диаметр пневмоматериалопровода, м |
| F_1, F_2 | площадь сечения, соответственно, входного и выходного отверстия конфузора, м ² |
| F_3 | площадь, занимаемая зерном в ограниченном слое, м ² |
| $F_{\text{тр}}$ | сила трения, Н |
| G | сила тяжести, Н |
| K | коэффициент аэродинамического сопротивления |
| L | суммарная длина рядка, м |
| M | общая площадь, занимаемая растениями, м ² |
| N | реакция связи, Н |
| ΔP | общие потери давления в системе, Па |
| P_1, P_2 и P_3 | статическое давление, соответственно, в сечениях 1–1, 2–2 и 3–3, Па |
| P_{PM} | потери давления на разгон посевного материала, Па |
| $P_{\text{ВН}}$ | внутренние потери давления в питателе, Па |
| $P_{\text{вент}}$ | давление, развиваемое вентилятором, Па |
| $P_{\text{тр}}$ | потери давления на трение, Па |
| $P_{\text{цб}}$ | центробежная сила, Н |
| $P_{\text{в}}$ | аэродинамическая сила, Н |
| $Q_{\text{М}}$ | подача материала, кг/с |
| $Q_{\text{общ}}$ | требуемый расход воздуха в сети, м ³ /ч |
| Q_i | расход воздуха в i -м пневмоматериалопроводе, м ³ /с |
| R | внешний радиус стенки отвода, по которой скользит частица, м |
| S | площадь поперечного сечения трубопровода, м ² |
| $S_{\text{ф}}$ | суммарная площадь условных кругов питания растений, м ² |
| $V_{\text{ч}}$ | объем частиц, м ³ |

Малые буквы греческого алфавита

| | |
|--------------------|--|
| α_1 | угол сужения первой ступени конфузора, град. |
| α_2 | угол сужения второй ступени конфузора, град. |
| β | угол сужения конфузора, град. |
| $\eta_{\text{в}}$ | КПД вентилятора |
| $\eta_{\text{пр}}$ | КПД привода вентилятора |

| | |
|-------------|---|
| λ | коэффициент трения воздуха о поверхность воздуховода |
| μ | весовая концентрация материала в воздушном потоке, кг/кг |
| ν | коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$ |
| ν_C | коэффициент вариации высева материала по семяпроводам |
| ν_1 | коэффициент вариации высева материала зерновыми дозаторами |
| ν_2 | коэффициент вариации высева материала дозаторами удобрений |
| ν_{2CP} | средний коэффициент вариации высева материала распределителем |
| ξ_1 | коэффициент аэродинамического сопротивления конфузора |
| ξ_2 | коэффициент аэродинамического сопротивления диффузора |
| ξ_{TP} | коэффициент аэродинамических потерь на трение |
| ξ_{PA} | коэффициент аэродинамических потерь на расширение |
| ρ_B | плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$ |
| ρ_M | плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$ |
| ω | текущее значение угла поворота, град. |

Большая буква греческого алфавита

Θ коэффициент неравномерности

Большая буква кириллического алфавита

П коэффициент удельного падения давления

Критерий подобия

Re число Рейнольдса $Re = \frac{\rho_{ac} v_{ac} L}{\mu}$

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности растениеводства на основе получения высоких урожаев при минимальных затратах неразрывно связано с комплексным решением вопросов разработки и внедрения ресурсосберегающих технологий возделывания сельскохозяйственных культур и соответствующих технических средств для их реализации, обеспечивающих качественное и своевременное выполнение каждой технологической операции. Государственной программой развития аграрного бизнеса на 2016–2020 годы предусматривается доведение валового сбора зерна до 10 млн т [1]. Достижение таких показателей возможно при средней урожайности 40...42 ц/га, зависящей от ряда факторов: почвенно-климатических условий, сортности семян возделываемых культур, соблюдения агротехнических сроков и качества посева, обеспечения растений требуемым количеством питательных веществ. Недобор урожая только при несоблюдении сроков сева зерновых культур достигает 18 %...30 % [2]. Следует учитывать, что одним из важнейших звеньев технологии возделывания является операция посева – основа будущего урожая.

В настоящее время в сельскохозяйственном производстве применяются посевные машины с пневматическими и механическими системами высева. Основными посевными машинами с механической системой высева, применяемыми в Республике Беларусь, являются прицепные сеялки семейства СЗ производства ОАО «Красная звезда» (Украина), а также сеялки западноевропейских фирм: Vaderstad (Швеция), Amazone, Lemken, Horsch (Германия), Sulky (Франция), Gaspardo (Италия), Kverneland (Норвегия). Несмотря на простоту конструкции и надежную работу механические сеялки имеют существенные недостатки: ограниченная рабочая ширина захвата (до 5,4 м); высокая материалоемкость; большие затраты времени, связанные с техническим и технологическим обслуживанием, переездами и заправкой бункера посевным материалом; низкая рабочая скорость (7...10 км/ч). Доля выпускаемых моделей зарубежных сеялок с механической системой высева уменьшается с увеличением ширины их захвата. Так, если при ширине захвата до 3 м они составляют 75 % всех производимых моделей, то при ширине захвата 3...4 м их доля уже равна 50 %. Наиболее широкое распространение

в сельскохозяйственном производстве республики получили сеялки и созданные на их базе почвообрабатывающе-посевные агрегаты с пневматической системой высева. Это связано с их существенными преимуществами: возможностью создания широкозахватных агрегатов с шириной захвата до 24 м (Sprinter NT фирмы Horsch (Германия)); удельной материалоемкостью, меньшей на 20 %...25 %; возможностью их использования в комбинированных почвообрабатывающе-посевных агрегатах (Cirrus фирмы Amazone (Германия), Rapid A фирмы Vaderstad (Швеция)); применением объемного централизованного бункера (17 м³ и более) и автономной системы его загрузки. Использование высокопроизводительной посевной техники позволяет обеспечить выработку каждой из них до 1000 га за сезон, что актуально и для Беларуси по причине острого дефицита квалифицированных механизаторов. Из опыта передовых сельскохозяйственных предприятий республики следует, что при техническом переоснащении основной акцент делается на снижение трудозатрат при производстве продукции растениеводства. Это достигается за счет использования широкозахватных сеялок и почвообрабатывающе-посевных агрегатов с энергонасыщенными тракторами больших тяговых классов. Эффективность применения таких агрегатов при возделывании зерновых культур подтверждена многими исследованиями [3–6]. Практикой также установлено, что сменная производительность сеялок с пневматической системой высева на 15 %...20 % и более превосходит производительность агрегатов с механическими сеялками при одинаковой ширине их захвата [7].

Однако наряду с достоинствами пневматическая система высева имеет ряд существенных недостатков. Известно, что неравномерность распределения семян по сошникам при высеве зерновых и зернобобовых культур превышает значения, регламентированные агротребованиями, и составляет в среднем 9,6 %...15,5 % для зерновых культур при допустимых 5 % [8]. Установлено, что при неравномерности высева между сошниками выше 10 % наблюдается устойчивое снижение урожайности на 1...2 ц/га [9, 10]. Это обусловлено несовершенством технологического процесса распределения семян распределительными устройствами. Необходимо особо отметить недостаточность комплексных исследований работы пневматических сеялок. Известные исследования по данному вопросу носят в основном экспериментальный характер и сводятся к опытной

проверке отдельных конструктивных решений по совершенствованию, например, распределителей пневматических зерновых сеялок. Недостаточно полно проведены теоретические исследования процесса движения и распределения семян в распределителях. Это сдерживает целенаправленное совершенствование распределителей посевного материала. Поэтому разработка и создание пневматической системы высева, обеспечивающей регламентированную неравномерность распределения посевного материала между сошниками, является актуальной научной агроинженерной задачей. На основе анализа конструктивно-технологических схем посевных машин, выполненных теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию оптимальных параметров комбинированного вертикального и горизонтального распределителей, проверки результатов исследований при натурных испытаниях разработаны новые пневматические системы высева для сеялок С-9, СПП-9, комбинированных почвообрабатывающе-посевных агрегатов АППА-4 и АППА-6.

ГЛАВА 1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕХАНИЗАЦИИ ПОСЕВА СЕМЯН ЗЕРНОВЫХ И ЗЕРНОБОБОВЫХ КУЛЬТУР

1.1. Агротехнические требования к посеву зерновых культур и влияние равномерности распределения семян по площади поля на урожайность зерна

Обеспеченность культурных растений во время вегетации влагой, питательными веществами и воздухом напрямую зависит от окружающей среды, к которой предъявляют определенные требования. Наилучшее сочетание водного, воздушного и теплового факторов проявляется при равномерном распределении семян по площади поля на заданную (оптимальную) глубину.

Влияние указанных факторов на рост, развитие сельскохозяйственных культур и, как итог, на их урожайность в достаточной степени изучены агрономической наукой. В настоящее время для посева зерновых культур используется большое количество посевных машин различных типов. В связи с этим кратко рассмотрим агротехнические требования, предъявляемые к посевным машинам, и влияние их на величину урожая.

Основными задачами, которые должна решать посевная машина, являются равномерное распределение семян по площади поля с заданной нормой высева и заделка их на определенную глубину, обеспечение плотного контакта семян с влажной почвой. При этом должны соблюдаться следующие основные агротехнические требования [8]:

- посев должен быть выполнен в оптимальные сроки: 5...7 дней – для озимых культур, 1...4 дня – для яровых. Каждое отдельное поле должно быть засеяно за 1...1,5 дня;

- отклонение фактической глубины заделки семян от заданной не должно превышать ± 1 см. Не менее 80 % семян должно находиться на заданной глубине;

- неустойчивость общего высева не должна превышать 3 % для зерновых, 5 – для зернобобовых и 10 % – для минеральных удобрений;

- допустимая неравномерность высева семян по сошникам для зерновых культур – 5 %, зернобобовых – 6, гранулированных минеральных удобрений – 10 %;

- дробление семян зерновых культур должно быть не более 0,5 %, зернобобовых – не более 1,0 %;

- отклонение фактической нормы высева от заданной не должно превышать $\pm 5\%$ для семян и $\pm 10\%$ для удобрений;
- отклонение фактической ширины междурядий от конструктивной не должно превышать ± 5 см для стыковых и ± 2 см для основных;
- наличие незаделанных семян на поверхности почвы не допускается;
- поверхность засеянного поля должна быть выровненной, с допустимыми размерами гребней и бороздок не более 2 см.

На основании этих агротехнических требований и разрабатывается высевающая система зерновых и зернотуковых посевных машин.

Одна из основных задач проведения сева состоит в обеспечении наилучших условий для прорастания семян и дальнейшего развития растений, а также в получении их оптимальной густоты при равномерном размещении в рядах [9–11].

Академик ВАСХНИЛ Н. А. Майсурян отмечает, что важным в развитии растений является равномерность их освещения и, следовательно, использования ими энергии солнечного света [12]. Это условие выполняется только при равномерном распределении растений по площади, что способствует повышению урожайности и экономии посевного материала [13]. Формируется мощная корневая система, растения хорошо затеняют почву, лучше заглушают сорняки, полнее используют питательные вещества и влагу [14].

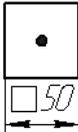
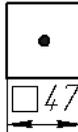
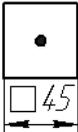
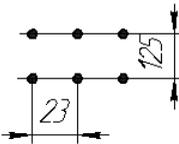
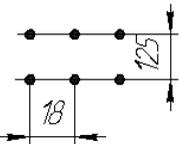
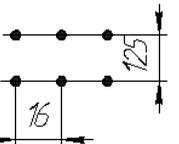
Каждая культура для нормального развития требует определенной площади питания. В соответствии с этим обосновывается оптимальная густота насаждения растений, при которой учитывается не только максимальная продуктивность, но и суммарная урожайность. В работе [13] отмечается, что большое значение имеет не только величина площади питания, но и ее конфигурация. Теоретически оптимальной, с учетом использования влаги, солнечного света, углекислоты воздуха и питательных веществ, а также ослабления отрицательного взаимодействия растений, является площадь питания каждого из них, приближающаяся к кругу. Как отмечает А. В. Курбатов [14], совершенным способом посева является такой, при котором площадь питания будет иметь форму правильного шестиугольника. На практике выполнить это требование при посеве зерновых культур невозможно. Наиболее приемлемым является вариант, при котором площадь питания приближается к квадрату.

Агротехнически обоснованные оптимальные площади питания и фактическое распределение при ширине междурядий 125 мм

(наиболее распространено для рядовых зерновых сеялок в Республике Беларусь) в зависимости от норм высева для основных зерновых культур представлены в табл. 1.1 [15]. Анализ данных табл. 1.1 показывает, что даже в идеальном случае семена располагаются в рядке на расстоянии 16...23 мм друг от друга, а форма площади питания имеет форму вытянутого прямоугольника. Такое расположение не может способствовать повышению урожайности из-за нерационального использования предоставленной растениям площади питания.

Таблица 1.1

Распределение семян по площади посева

| Форма площади питания | Норма высева семян различных культур, шт./м ² | | |
|-----------------------|---|---|---|
| | Озимая рожь, 350...400 | Озимая пшеница, 400...450 | Овес, 500 |
| оптимальная |  |  |  |
| при рядовом посеве |  |  |  |

В исследованиях [16] отмечено, что независимо от ширины междурядий оптимальное расстояние между зерновками должно составлять 3...4 см. Уменьшение этого расстояния до 1 см приводит к скачкообразному снижению урожайности вследствие снижения продуктивности колоса и его устойчивости к полеганию. При увеличении расстояния свыше 6 см растения не будут использовать всю поступающую фотосинтетически продуктивную радиацию, кроме того, в таких посевах распространяется сорная растительность.

Исследованиями [17] установлена связь между густотой посева и энергией кущения: редко размещенные растения зерновых культур кустятся сильнее и этим увеличивают общее число продуктивных стеблей в благоприятных условиях до уровня, который достигается при более густом посеве. Кроме того, для зерновых культур характерно свойство «изреживания» при загущенных посевах.

При более равномерном распределении семян по площади и глубине растения дают бóльшую урожайность [18].

Исследования Ф. Е. Колясева [19] и Д. В. Ипполитова [20], проводимые ими в течение ряда лет, показывают, что при правильном распределении семян яровой пшеницы и овса по площади фитолимата (влажность почвы, влажность и температура воздуха в посевах, освещенность и др.) создаются более благоприятные для растений условия как в начальный, так и в дальнейший период их вегетации. В результате увеличивается полевая всхожесть семян, и за вегетационный период уменьшается число погибших растений.

По методике, разработанной УкрНИИМЭСХ [21], размещение растений по площади оценивается общим коэффициентом равномерности:

$$\mu = S_{\phi} / R, \quad (1.1)$$

где S_{ϕ} – суммарная площадь условных кругов питания растений, м^2 ; R – общая площадь, занимаемая растениями, м^2 .

При идеальном распределении по занимаемой площади $S = R$. В действительности, вследствие неравномерности распределения растений, условные круги их питания перекрываются. Поэтому

$$S_{\phi} = R - \sum E_i, \quad (1.2)$$

где $\sum E_i$ – суммарная площадь перекрытия кругов питания соседних растений, м^2 .

Поэтому для реальных посевов всегда

$$S_{\phi} < R \text{ и } 0 < \mu_p < 1. \quad (1.3)$$

Коэффициент μ_p для рядового посева определяется по формуле

$$\mu_p = 1 - \frac{1}{aL} \sum_{i=1}^n \left[\frac{2aL}{\pi n} \arccos \left(\frac{c_i}{2} \sqrt{\frac{\pi n}{aL}} \right) - c_i \sqrt{\frac{aL}{\pi n} - \frac{c_i^2}{4}} \right], \quad (1.4)$$

где a – ширина междурядья, м; L – суммарная длина рядка, м; n – количество растений в рядке, шт.; c_i – интервал между i -й парой соседних в ряду растений, м.

Чем ближе значение коэффициента μ_p к единице, тем равномернее распределение растений по площади поля. При рядовом способе посева с междурядьем от 75 до 150 мм значение коэффициента μ_p находится в пределах 0,53...0,42. Наибольшая равномерность получается при шахматном размещении растений ($\mu = 0,964$). Однако рядовыми зерновыми сеялками такую равномерность обеспечить невозможно.

В настоящее время в Республике Беларусь широко применяются пневматические отечественные сеялки семейства СПУ (прототип европейской сеялки Accord) и импортные с аналогичной системой высева, обеспечивая раскладку семян пшеницы со средним расстоянием между зерновками в ряду 29,3 мм. При этом наблюдаются участки с расстоянием между зерновками от 3 до 133 мм (коэффициент вариации составляет 91,4 % [22]), по другим данным – 112 %...130 % [23]. Не соответствует агротехническим требованиям и поперечная равномерность распределения семян по рядкам. Здесь коэффициент вариации для зерновых культур находится в пределах от 6 до 14,6 % [24]. Применение сеялок с такими показателями существенно снижает генетический потенциал районированных сортов зерновых и зернобобовых культур, что отрицательно сказывается на урожайности.

Анализ результатов научных исследований и передовой практики позволяет утверждать, что равномерное распределение семян по площади поля оказывает положительное влияние на полевую всхожесть, уменьшает биологическое угнетение растений, позволяет им интенсивнее использовать влагу и солнечный свет, приводит к снижению числа погибших растений и засоренности посевов сорными растениями и, как результат, повышает урожайность.

В связи с этим разработка технических средств, повышающих равномерность распределения посевного материала по площади поля, является важной агроинженерной задачей.

1.2. Применяемые технологии, состояние и перспективы развития машин для посева семян в Республике Беларусь

Основными задачами для посевной машины являются равномерное распределение семян по площади поля с заданной нормой высева, заделка их на определенную глубину и обеспечение плот-

ного контакта семян с влажной почвой. При этом должны соблюдаться следующие агротехнические требования [8]: выполнение посева в оптимальные сроки; соблюдение требуемого отклонения фактической глубины заделки семян от заданной; соответствие неустойчивости общего высева заданной; обеспечение допустимой неравномерности высева семян по сошникам; дробление семян в заданных пределах; обеспечение отклонения фактической нормы высева семян от заданной и отклонение фактической ширины междурядий от конструктивной. На основании этих агротехнических требований и разрабатываются высевающие системы посевных машин.

В настоящее время как за рубежом, так и в Республике Беларусь все современные сеялки по способу высева посевного материала можно разделить на механические и пневматические.

Основными механическими сеялками, применяемыми в республике, являются прицепные сеялки семейства СЗ (СЗ-3,6; СЗ-5,4; СЗТ-3,6; СЗЛ-3,6; СЗУ-3,6) ОАО «Красная звезда» (Украина) (рис. 1.1а), а также прицепные и навесные сеялки зарубежных фирм: Vaderstadt (Швеция) (рис. 1.1б); Amazone (Германия) (рис. 1.1в); Sulky (Франция) (рис. 1.1г); Gaspardo (Италия) (рис. 1.1д), Great Plains 1500 (США) (рис. 1.1е), которые используются в основном в составе почвообрабатывающе-посевных агрегатов.

Несмотря на простоту конструкции и надежность работы механические сеялки имеют существенные недостатки. Основные из них – ограниченная ширина захвата (не более 5,4 м) и высокая удельная материалоемкость.

Ряд исследователей [25–28] пришли к общему выводу о том, что потенциал модернизации традиционных механических сеялок с шириной семенного бункера, равной рабочей ширине захвата, и индивидуальным высевающим аппаратом на каждый сошник весьма ограничен и во многом исчерпал себя. Так, широкозахватные агрегаты, составленные из механических сеялок, помимо отмеченной уже высокой материалоемкости, имеют такой недостаток, как большие непроизводительные затраты времени, связанные с техническим и технологическим обслуживанием, перездами и заправкой бункера посевным материалом, низкой рабочей скоростью (7...10 км/ч). Необходимо отметить, что доля выпускаемых моделей зарубежных сеялок с механической системой высева

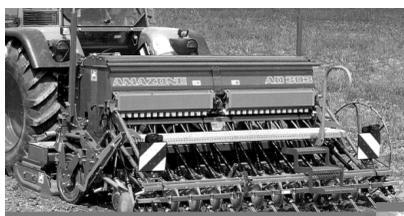
уменьшается с увеличением их ширины захвата. Так, если при ширине захвата до 3 м они составляют 75 % всех производимых моделей, то при ширине захвата 3...4 м доля их равна 50 % [29]. В последнее время ведущие мировые изготовители механических сеялок с целью увеличения объема бункера совершенствуют конструкцию последнего путем применения дополнительных приставок, тем самым еще более увеличивая материалоемкость сеялки.



а



б



в



г



д



е

Рис. 1.1. Механические сеялки, применяемые при посеве зерновых культур:
а – СЗУ-3,6 (Украина); *б* – Vaderstadt Rapid 300S (Швеция);
в – Amazone AD 30-3 (Германия); *г* – Sulky Tramline CX (Франция);
д – Gaspardo M-300 (Италия); *е* – Great Plains 1500 (США)

Принимая во внимание недостатки посевных машин с механическими высевальными системами, ряд ученых [30, 31] считают целесообразным ограничить ширину их захвата определенными рамками (максимум 5,4 м). Для построения широкозахватных посевных машин, работающих на повышенных скоростях, предполагается изыскать принципиально иную конструктивную схему.

Проанализировав ряд отечественных и зарубежных литературных источников [32–53], а также производственный опыт передовых сельскохозяйственных предприятий страны, можно сделать вывод, что одним из перспективных направлений в развитии посевных машин является разработка широкозахватных высокопроизводительных сеялок и посевных комплексов с пневматической системой высева.

По данным Министерства сельского хозяйства и продовольствия по состоянию на 01.01.2013 г., соотношение различных видов средств механизации посева, применяемых в Республике Беларусь, следующее: пневматические – 79 %, механические – 8, сеялки точного высева – 13 % (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Соотношение средств механизации посева с различными видами высевальных систем в Республике Беларусь

Анализ данных рис. 1.2 показывает, что в структуре посевной техники основную долю – 79 % составляют сеялки с пневматической системой высева. Появление в 60-х гг. XX в. посевных машин с пневматическими системами высева связано с разработками шведской фирмы Arvika Thermenius (сеялка EB с шириной захвата 2,52 м) и немецкой фирмы H. Weiste and Co (сеялка Accord с шириной захвата до 6 м) [51].

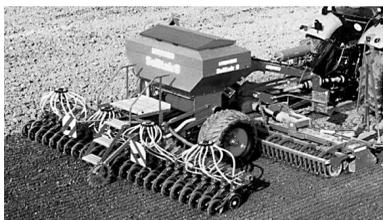
Позже разработкой и выпуском машин данного типа занялись фирмы США (John Deere, Great Plains), Европы (Kverneland, Gaspardo, Amazone, Kuhn, RabeWerk, Horsch, Kockerling, Lemken, Unia, Roge»), а также отечественные заводы-изготовители (ОАО «БЭМЗ», ОАО «Лидагпроммаш», ОАО «Бабруйсксельмаш») (рис. 1.3).



a



б



в



г



д



е



ж



з

Рис. 1.3. Посевные машины с пневматической системой высева:
a – Megaseed, фирма RabeWerk (Германия); *б* – Pronto AC, фирма Horsch (Германия); *в* – Soliter 9+Zirkon 9, фирма Lemken (Германия); *г* – Rapid A, фирма Vaderstad (Швеция); *д* – Cirrus, фирма Amazone (Германия); *е* – Terrasem T, фирма Pottinger (Австрия); *ж* – АППА-6, фирма ОАО «Бобруйсксельмаш» (Республика Беларусь); *з* – FastLiner, фирма Kuhn (Франция)

Создание широкозахватных сеялок с пневматическими системами высева было также предусмотрено системой машин СССР конца 80-х гг. Следует отметить работу таких организаций, как ВИСХОМ, ВИМ, ВНИИЗХ, ВНИИМЭСХ, ЦНИИМЭСХ. Созданные ими опытные образцы сеялок (СЗС-14, СПР-6, СЗПЦ-8, СЗПЦ-12, СЗПЦ-18, СЗШЦ-10,8, СПУ-3, С-6 и С-6Т), а также почвообрабатывающе-посевные агрегаты на их базе значительно превосходили механические сеялки по производительности, имели меньшие показатели по удельной материалоемкости и трудозатратам (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Сеялки пневматические СПУ-6

Значительный вклад внесли ученые Белорусской ГСХА К. К. Курилович, Ф. Г. Гусинцев, А. С. Сентюров, В. С. Астахов, разработки которых нашли применение в отечественных образцах сеялок с пневматическими системами высева.

Использование посевных машин с высевающими системами пневматического типа обусловлено следующими преимуществами (в сравнении с аналогичными машинами с механическими системами высева):

- производительность на 15 %...20 % выше даже при одинаковой ширине захвата [7];
- возможность конструктивно создавать широкозахватные (от 6 м) высокопроизводительные посевные машины и комплексы;
- не требуется проведение дополнительных операций по агрегатированию при переводе машины из транспортного положения в рабочее и обратно;
- возможность применения бункера для посевного материала большого объема, что позволяет уменьшить количество заправок в работе;
- низкая удельная материалоемкость.

Наряду с достоинствами, сеялки с пневматической системой высева имеют следующие недостатки:

– необходимость создания и поддержания транспортирующего воздушного потока с постоянными параметрами индивидуально для определенных групп культур;

– тщательная подготовка посевного материала, исключающая наличие посторонних предметов во избежание забивания пневмоматериалопроводов.

Основным недостатком посевных машин с пневматической системой высева является высокая неравномерность распределения посевного материала по сошникам. В некоторых случаях неравномерность может составлять 15,5 % и более при агротехнически допустимых 5 % для семян зерновых и 6 % – для зернобобовых культур [8], последствиями чего являются нерациональный расход семенного материала, снижение урожайности, рост засоренности полей, что уменьшает эффективность использования сеялок с пневматической системой высева [54, 55]. Поэтому совершенствование систем высева пневматических сеялок является актуальной задачей в области механизации посева.

1.3. Основные типы сеялок и их высевающих систем

В настоящее время все посевные машины – сеялки и комбинированные почвообрабатывающе-посевные агрегаты – имеют высевающие системы, которые подразделяются на механические и пневматические.

Основными механическими сеялками, применяемыми в Республике Беларусь, являются прицепные сеялки семейства СЗ производства ОАО «Красная звезда» (Украина), а также прицепные и навесные сеялки зарубежных фирм: Vaderstad (Швеция), Amazone (Германия), Sulky (Франция), Gaspardo (Италия). Механические сеялки просты по конструкции, обеспечивают равномерное распределение семян по сошникам и надежны в работе. С целью увеличения спроса на эти сеялки многие фирмы продолжают работать над их совершенствованием и стараются оперативно адаптировать их к условиям эксплуатации в странах СНГ [56].

Однако доля выпускаемых сеялок с механической системой высева уменьшается в связи с необходимостью увеличения их ширины

захвата. Поэтому сеялки с шириной захвата от 6 до 18 м зарубежные фирмы производят с пневматической системой высева.

Достоинством сеялок с пневматической системой высева являются:

а) возможность конструктивно создавать широкозахватные высокопроизводительные посевные машины, обеспечивающие полную загрузку энергетических средств;

б) не требуется проведение дополнительных операций агрегатирования при переводе машины из транспортного положения в рабочее и обратно;

в) возможность использования бункера для посевного материала достаточно большого объема, что позволяет уменьшить количество необходимых заправок в работе и, естественно, увеличить производительность;

г) конструктивная простота составляющих элементов;

д) меньшая удельная материалоемкость.

Наряду с достоинствами сеялки с пневматической системой высева имеют следующие недостатки:

а) необходимость создания и поддержания транспортирующего воздушного потока с постоянными параметрами индивидуально для определенных культур и норм высева;

б) тщательная подготовка посевного материала, исключающая посторонние предметы и качественные гранулированные удобрения;

в) резкая зависимость неравномерности распределения посевного материала по сошникам от параметров воздушного потока и качества изготовления составляющих конструктивных элементов системы.

Несмотря на недостатки, необходимость повышения производительности труда и снижения энергозатрат определяют применение пневматических систем высева в перспективе.

В настоящее время в мировой практике производства посевных машин, где в качестве транспортирующего элемента используется воздушный поток, различают три типа высевающих систем: централизованного (одно и двухступенчатые), индивидуального и группового дозирования посевного материала (рис. 1.5).

Каждая такая система имеет строгий набор рабочих органов для осуществления технологического процесса высева: вентилятор, дозатор, устройство для ввода материала в воздушный поток (питатель), пневмоматериалопроводы и устройства для распределения материала по сошникам.

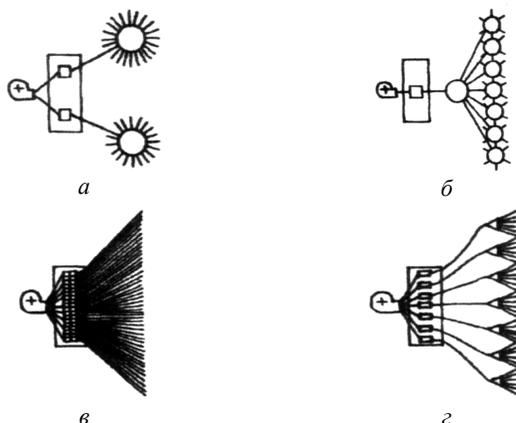


Рис. 1.5. Типы пневматических систем высева зерновых сеялок:
а – централизованная одноступенчатая; *б* – централизованная
двухступенчатая; *в* – индивидуальная; *г* – групповая

Впервые в СССР оригинальная система с централизованным дозированием и пневматическим транспортированием материала к сошникам была предложена Б. И. Журавлевым [57] в 1948 г., однако должного применения в посевных машинах того времени она не нашла.

Начало внедрению в производство сеялок с централизованным дозированием положил норвежский агроном В. Стокланд, разработавший центробежный высевающий аппарат, впоследствии примененный фирмой «Глобус Машиненфабрик» на сеялке Stokland. По причине крупных конструктивных и технологических недостатков его предложение применения не получило.

Дальнейшее развитие пневматическая высевающая система централизованного дозирования получила в Германии в 80-х гг. XX в. на сеялках Assord, когда впервые началось массовое производство сеялок с пневмомеханическим высевающим аппаратом [58] (рис. 1.6). Одноступенчатое распределение было реализовано также на сеялках и посевных агрегатах фирмами Kverneland, Gaspardo, Amazone, Kuhn, Rabe. Преимущество данной системы в том, что она универсальна и обеспечивает высев семян с различными физико-механическими свойствами. Применение комбинированной катушки позволяет высевать как крупные семена зерновых и средние семена зернобобовых, так и мелкие семена трав и промежуточных культур. Система обеспечивает простую установку нормы высева [29].

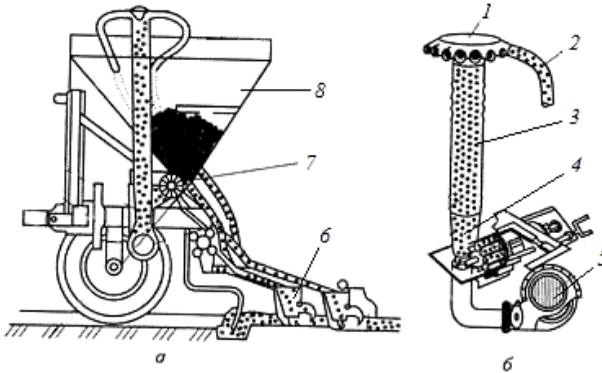


Рис. 1.6. Схема сеялки (а) и пневматической системы высева (б) с централизованным дозированием типа Accord:

- 1 – распределительная головка; 2 – семяпровод;
 3 – центральная колонна; 4 – питатель эжекторного типа;
 5 – вентилятор; 6 – сошник; 7 – дозатор; 8 – бункер

Но данная система довольно энергоемка. Установлено [59], что система высева с вертикальной распределительной головкой в 2–3 раза более энергоемка по сравнению с горизонтальной и требует установки более мощного вентилятора. Кроме того, неравномерность распределения посевного материала по сошникам в значительной степени зависит от угла наклона центральной колонны и варьирует в пределах 5 %...22 % [60].

Эти показатели еще выше при двухступенчатом распределении, которое реализовано в конструкции сеялок СЗПЦ-12 (СССР) (рис. 1.7), СПТ-7,2 (Республика Беларусь) и S-45 Leon (Канада).

Пневматическая система высева с централизованным дозированием применяется и в комбинированных почвообрабатывающе-посевных агрегатах. Так, немецкая фирма Accord разработала комбинированный агрегат [61] с бункером, вентилятором, дозатором и питателем на передней навеске, с почвообрабатывающей частью с распределителем и сошниками – на задней (рис. 1.8). Такая компоновка позволяет более равномерно распределить нагрузку на ходовую систему и улучшить тяговую способность трактора, уменьшить кинематическую длину агрегата, что значительно повышает маневренность, особенно при работе на мелкоконтурных полях, где требуется энергетическое средство меньшей мощности. В системе с индивидуальным дозированием семян (рис. 1.5б), для каждого сошника имеется отдельный дозатор, и транспортирование семян осуществляется воздушным потоком.

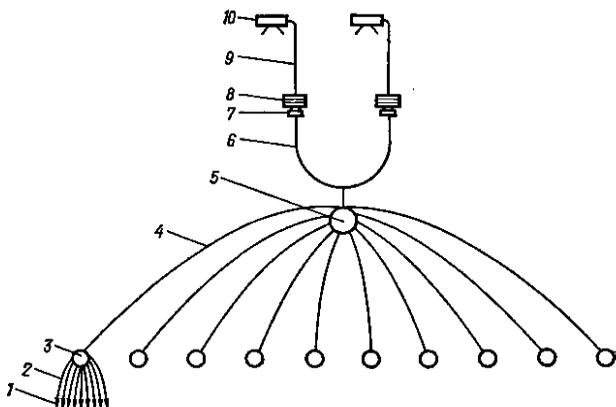


Рис. 1.7. Схема пневматической сеялки СЗПЦ-12:
 1 – сошник; 2 – семяпровод; 3 – распределитель второй ступени;
 4 и 6 – пневмосемяпроводы; 5 – распределитель первой ступени;
 7 – дозатор туков; 8 – дозатор семян; 9 – пневмопровод; 10 – вентилятор



Рис. 1.8. Сеялка DF-1 фирмы «Accord» (Германия)
 с фронтальным расположением бункера

Примером таких систем высева являются системы сеялок и агрегатов Reguline Solo 6.0m, Reguline SPI фирмы Sulky (Франция), Maxidrill RW 600/900, Maxidrill TW 6000 фирмы Roger (Франция), Tive (Швеция) (рис. 1.9), СПР-6 (СССР) и др. Данная система обеспечивает более равномерное распределения семян по сошникам, аналогичное механическим сеялкам [62].

Сеялка может перестраиваться на различную ширину междурядий и различную ширину захвата путем перекрытия необходимого числа высевующих аппаратов [60].

Однако из-за большого количества семяпроводов, идущих от дозаторов к сошникам, значительно ухудшается технологическая надежность сеялок и значительно усложняется их конструкция. Данная система применяется на сеялках с шириной захвата не более

9 м, так как увеличение ширины захвата влечет за собой рост габаритных размеров семенного бункера [29]. Как система с централизованным, так и система с индивидуальным дозированием очень энергоемка и требует установки на сеялку вентилятора высокой производительности. В настоящее время такую систему при производстве посевной техники используют только французские фирмы Sulky и Roger.

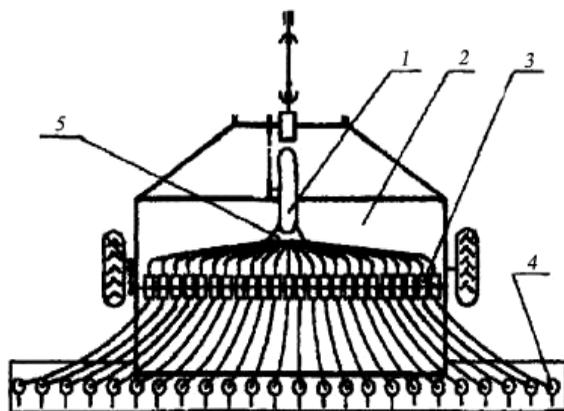


Рис. 1.9. Схема сеялки Tive (Швеция) с индивидуальным дозированием:
1 – вентилятор; 2 – бункер; 3 – дозатор; 4 – сошник; 5 – воздухопровод

Все более широкое применение находят пневматические сеялки с системой группового дозирования семян: С-6 (БЭМЗ, Республика Беларусь), Solitair, Lemken (Германия), Maxim, Morris (Канада).

Такая система состоит из нескольких самостоятельных высевających секций, каждая из которых содержит следующие рабочие органы: дозатор, питатель и одноступенчатый распределитель потока посевного материала (см. рис. 1.5з). Все секции через дозаторы связаны с единым бункером, при этом каждая из них предназначена для определенного количества сошников [63]. Так как количество материала, подаваемого катушкой дозатора, уменьшается, возрастает и точность дозирования. Посевные агрегаты с такой системой высева могут комплектоваться распределителями горизонтального или вертикального типа, что расширяет диапазон ее применения.

В странах Западной Европы и Америки широкое применение находят пневматические системы группового дозирования в сеялках Lemken (Германия) (рис. 1.10), Morris (Канада) (рис. 1.11), Sunflower, Great Plains (США).



Рис. 1.10. Сеялка Solitair-9 фирмы Lemken (Германия)

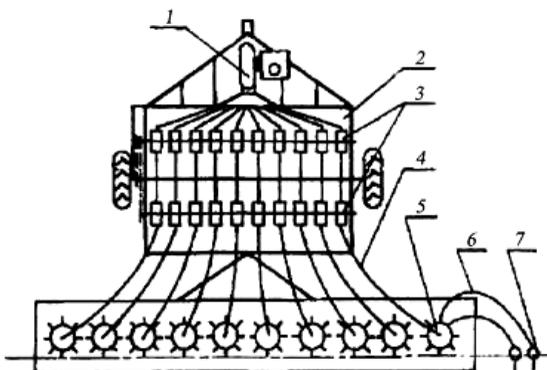


Рис. 1.11. Схема сеялки Morris-620 (Канада) с групповым дозированием:
 1 – вентилятор; 2 – бункер; 3 – дозатор; 4 – материалопровод;
 5 – распределительная головка; 6 – семяпровод; 7 – сошник

Все они имеют единую принципиальную схему с одноступенчатым делением. Число дозаторов равно числу распределителей (от 3 до 10) и зависит от ширины захвата агрегата. Агрегаты с шириной захвата более 6 м комплектуются прицепными бункерами повышенной вместимости до 6 т и высотой до 1,8 м, что облегчает загрузку семенами и удобрениями [64].

Оригинальную пневматическую систему высева разработала финская фирма Kongskilde [65]. В этой системе (рис. 1.12) вентилятор нагнетает воздух в два воздушных канала. По одному из них часть воздуха направляется для подачи семян из бункера в дозатор. По второму каналу воздушный поток транспортирует высеваемый материал от дозатора к сошникам. Такая система обеспечивает надежную работу

дозатора и устойчивое транспортирование материала. Несмотря на существующие достоинства, эта система высева в настоящее время распространения не получила.

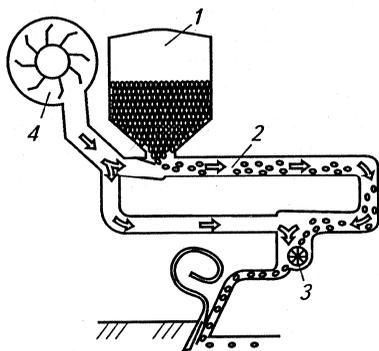


Рис. 1.12. Высевающая система пневматической интегральной сеялки фирмы Kongskilde:
1 – бункер; 2 – тукосемяпровод; 3 – высевающая катушка; 4 – вентилятор

Работы по совершенствованию почвообрабатывающе-посевных и посевных машин активно ведутся во многих странах.

В Республике Беларусь накоплен определенный опыт в разработке и производстве посевных машин с пневматическими высевающими системами. Ряд предприятий в настоящее время осваивает производство сеялок и почвообрабатывающе-посевных агрегатов с системами группового дозирования семян и плоскими делительными головками. Сравнительные испытания посевных агрегатов с пневматическими системами высева [31, 66], выявили ряд существенных недостатков по обеспечению качественных показателей выполнения технологического процесса сева. Особенно это касается равномерности распределения по площади поля посевного материала при совместном высеве зерновых с фосфорными удобрениями. Из анализа существующих систем высева можно сделать вывод о том, что для широкозахватных высокопроизводительных посевных машин наиболее приемлема пневматическая система высева с групповым дозированием посевного материала [67–69]. Однако, исходя из реальных условий Республики Беларусь, необходим одновременный высев припосевной (стартовой) дозы минеральных фосфорных удобрений, требующий проведения исследований

по определению конструктивных параметров и режимов работы элементов высевальной системы, обеспечивающих выполнение технологического процесса в соответствии с агротехническими требованиями [8].

1.4. Технологический процесс работы распределительно-транспортных устройств высевальных систем, их классификация и направления совершенствования

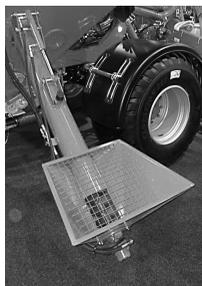
Современная сеялка с пневматической системой высева, как правило, имеет раздельно-агрегатную компоновку [70], при которой машина состоит из отдельных блоков (модулей). Это позволяет разнести в пространстве бункер и рабочие органы.

Пневматическая высевальная система и раздельно-агрегатная компоновка рабочих органов таких сеялок позволяют реализовать секционный принцип построения рамы посевного блока, при котором ее складывание происходит в вертикальной плоскости. Данное решение позволяет значительно ускорить процесс перевода сеялки из рабочего положения в транспортное и обратно, следовательно, снизить общие непроизводительные затраты времени на переезды (рис. 1.13).



Рис. 1.13. Сеялка с пневматической системой высева

Централизованный бункер сеялки позволяет снизить количество и продолжительность технологических остановок на заправку семенами и удобрениями. Применение автономной системы загрузки на широкозахватных сеялках с пневматической системой высева позволяет дополнительно снизить время и трудоемкость загрузки (рис. 1.14).



а



б



в

Рис. 1.14. Автономная система загрузки пневматических сеялок различных зарубежных фирм:
а – Kverneland (Норвегия); *б* – Lemken (Германия); *в* – Gaspardo (Италия)

Классификацией высевающих аппаратов, систем и посевных машин занимались многие ученые, однако работы, изначально ориентированные на сеялки с механическими высевающими аппаратами, нельзя в полной мере использовать для классификации современных машин с пневматическими высевающими системами.

Их можно применять ограничено, при рассмотрении отдельных элементов системы высева. Непосредственно классификация пневматических высевающих систем отражена в работах отечественных и зарубежных ученых В. С. Астахова, Н. П. Крючина, М. С. Хоменко, В. Н. Зволинского, Н. И. Любушко, К. К. Куриловича, Ф. Г. Гусинцева [5, 21, 24–32, 44].

Высевающие системы В. С. Астахов классифицирует по способу распределения: 1) централизованного дозирования двухступенчатые; 2) централизованного дозирования одноступенчатые; 3) индивидуального дозирования; 4) группового дозирования [31].

Хоменко М. С. предлагает выделить два основных типа централизованных высевающих систем: с индивидуальным дозированием и пневматической подачей семян в сошники и с общим дозированием [21].

Высевающие системы В. Н. Зволинский, Н. И. Любушко, Н. П. Крючин классифицируют в соответствии с конструктивным исполнением бункера и способу ввода посевного материала и выделяют два типа пневматических централизованных высевающих систем: с наддувом (герметичные) и без наддува (негерметичные) [44].

В приведенных примерах в основу классификаций положены конструктивное исполнение или способ воздействия на посевной материал. Так как высевающая система состоит из ряда взаимосвя-

занных элементов, оказывающих комплексное воздействие на технологический процесс высева, то для подробного ее рассмотрения и последующей детальной оценки с выявлением характера влияния тех или иных компонентов на общее качество работы системы необходима классификация, опирающаяся на сам принцип технологического процесса работы высевающей системы с пневматическим транспортированием посевного материала.

Основными элементами системы высева с пневматическим транспортированием посевного материала в сошники являются бункер, дозатор, устройство для ввода посевного материала в воздушный поток (питатель), вентилятор, пневмоматериалопровод, распределительное устройство и семяпровод (рис. 1.15).

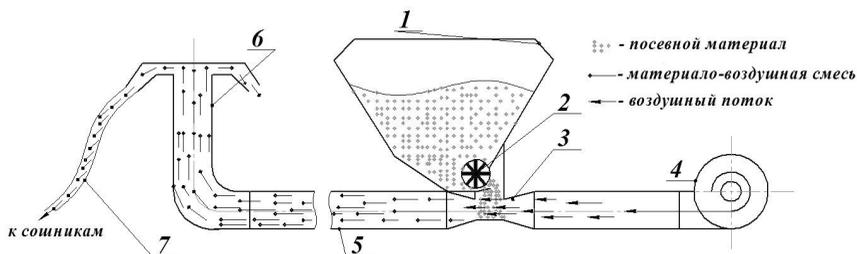


Рис. 1.15. Конструктивно-технологическая схема пневматической высевающей системы:

1 – бункер; 2 – дозатор; 3 – питатель; 4 – вентилятор; 5 – пневмоматериалопровод; 6 – распределительное устройство; 7 – семяпровод

Технологический процесс работы сеялки с пневматической системой высева представлен на рис. 1.16.

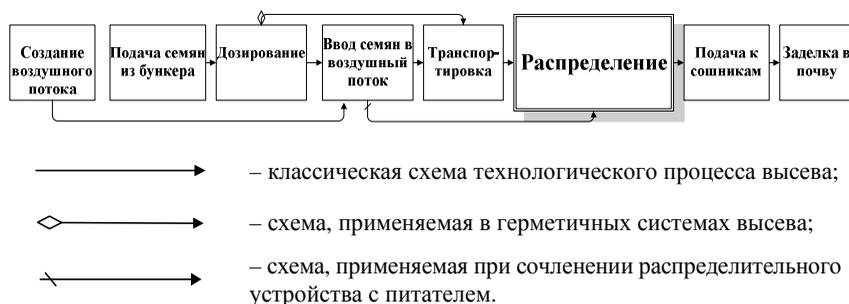


Рис. 1.16. Схема технологического процесса сеялки с пневматической системой высева

В соответствии с установленными признаками технологического процесса предлагается следующая классификация распределительно-транспортирующих систем пневматических сеялок.

По типу высеваемого материала различают зерновые, зернотравяные, зернотуковые, зернотукотравяные сеялки. Данное разделение имеет несколько условный характер. Так, зерновые сеялки способны высевать при некоторой перенастройке дозирующего устройства зернобобовые культуры и семена трав. Зернотуковые сеялки предполагают наличие дополнительного дозирующего устройства для туков, а также дополнительный бункер, что отражается на общей массе и компоновке агрегата и увеличивает количество дозоправок. Зернотукотравяные сеялки требуют многоходовой перенастройки сменных дозирующих элементов, и поэтому настройка их в полевых условиях весьма затруднена. Высев различных по физико-механическим свойствам материалов иногда требует применения дублирующих систем высева на одной машине, что увеличивает материалоемкость.

По способу ввода посевного материала в воздушный поток выделяют герметичные и негерметичные системы. В первой системе за счет герметизации давление в бункере и зоне ввода материала в пневмоматериалопровод выравнивается. Поток семян от дозатора беспрепятственно поступает в пневмоматериалопровод и далее транспортируется к распределителям и сошникам. Для поддержания стабильности давления в системе воздушный поток, создаваемый вентилятором, подается в бункер и дозатор.

Герметичные системы используются в основном на сеялках и почвообрабатывающе-посевных агрегатах с шириной захвата от 9 м: Horsch (Германия); Vaderstad (Швеция); Pottinger (Австрия); Sunflower (США); Morris, Concord AS-1002, Prasco 75-55 (Канада). Несмотря на кажущуюся простоту, герметичная система не лишена недостатков, так как обеспечение герметичности конструкции всех элементов системы требует высокого технологического уровня и культуры производства. Кроме того, при изменении уровня семян в бункере устойчивость высева снижается, и требуется применение более производительных вентиляторов.

Эти недостатки отсутствуют в негерметичных системах высева, в которых для ввода посевного материала в пневмоматериалопровод используются специальные устройства в виде шлюзового затвора, шнекового или эжекторного питателя. Поэтому негерметичные системы нашли более широкое применение.

По способу дозирования посевного материала существует деление на высевальные системы централизованного, группового и индивидуального дозирования [71].

В индивидуальных системах дозирования число дозаторов равно числу сошников (как в механических сеялках). При этом воздушный поток служит только для транспортирования семян от дозатора к сошникам, а ограниченная ширина захвата (до 6 м) сказывается на производительности агрегата.

Системы с групповым дозированием находят все более широкое применение, особенно на широкозахватных сеялках с шириной захвата от 9 м. Такая система состоит из нескольких самостоятельных секций, каждая из которых содержит дозатор и делительную головку. Количество дозаторов в системах с групповым дозированием может достигать 16. Количество семяпроводов, обслуживаемых одним распределителем, обычно не превышает 12.

Наибольшее распространение в мировой практике получили системы посева с централизованным дозированием семян одним или двумя дозаторами и последующим делением общих потоков на отдельные по сошникам с помощью распределителей. К преимуществам такой системы относится ее универсальность для посева различных семян, так как дозирование происходит при большой производительности. Система обеспечивает простую установку нормы посева.

По принципу распределения посевного материала системы посева разделяются на бесступенчатые, одноступенчатые и двухступенчатые.

Бесступенчатая система распределения семян применяется на пневматических сеялках индивидуального дозирования. Данную систему используют фирмы UNIA (Польша), Sulky и Roger (Франция).

Наибольшее распространение получили одноступенчатые системы распределения семян, где после дозатора-питателя посевной материал поступает в распределительное устройство, а оттуда – в сошники.

Двухступенчатые системы имеют более сложную конструкцию, большее количество пневмоматериалопроводов. Они более металлоемкие, требуют использования более мощных вентиляторов, у них затруднен перевод из рабочего положения в транспортное. Чем больше число ступеней распределения, тем выше итоговая неравномерность распределения посевного материала по сошникам.

По типу распределителей системы делятся на горизонтальные и вертикальные.

Распределительные устройства служат для распределения посевного материала по сошникам в пневматических системах высева централизованного или группового дозирования. Обобщенная классификация распределительно-транспортирующих систем пневматических посевных машин представлена на рис. 1.17.

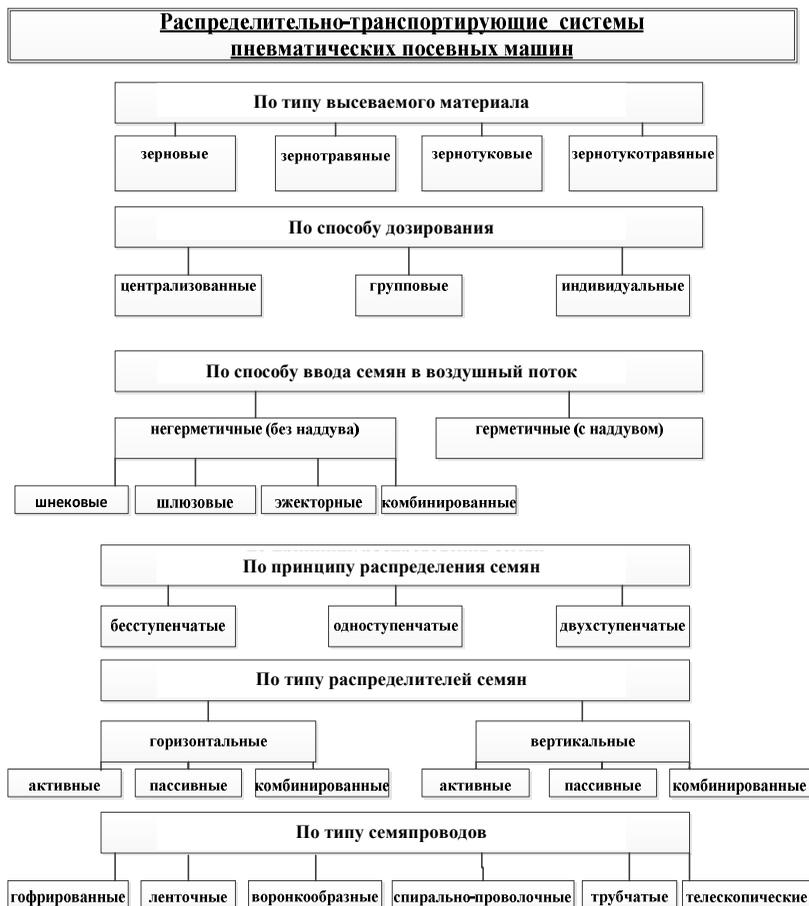


Рис. 1.17. Классификация распределительно-транспортирующих систем пневматических посевных машин

Приведенная классификация позволяет сравнивать и рассматривать разнотипные пневматические высевающие системы в совокупности всех их структурных элементов. Это позволяет использовать ее для комплексного анализа качества работы системы высева.

Анализ преимуществ и недостатков отдельных элементов пневматической высевающей системы, оказывающих влияние на технологический процесс, свидетельствует о том, что одной из наиболее важных частей системы являются распределители посевного материала. Они должны обеспечивать качественную работу пневматической системы высева в соответствии с агротехническими требованиями по неравномерности распределения посевного материала по сошникам. В связи с этим необходимо выполнить анализ известных конструкций распределителей посевного материала, а также провести обзор возможных дополнительных элементов, снижающих неравномерность распределения семян по сошникам.

Распределение посевного материала по сошникам в пневматических системах высева осуществляется с помощью распределительных устройств горизонтального или вертикального типа.

Горизонтальные распределители установлены на отечественных сеялках семейства С-6, почвообрабатывающе-посевных агрегатах семейства АППА, на посевных комплексах Morris (Канада) и Сириус-10 (Украина) (рис. 1.18).



Рис. 1.18. Горизонтальный распределитель пассивного действия фирмы Morris

Недостатком распределителей горизонтального типа является то, что они конструктивно ограничены в количестве обслуживаемых сошников (не более 12). Кроме того, они требуют обеспечения равномерного распределения по сечению потока материало-воздушной смеси на входе в распределитель. Для этого необходимо

конструкцию распределителя дополнять непосредственно перед ним прямым горизонтальным участком, равным 8...10 диаметрам материалопровода, что составляет порядка 500...600 мм, или применять дополнительные выравнивающие устройства. В известных посевных машинах реализация такого конструктивного предложения зачастую оказывается невозможна по компоновочным требованиям. Поэтому широкого распространения на посевных машинах данный тип распределителей не нашел.

Распределители вертикального типа нашли применение в мировой практике на посевных машинах как с централизованным дозированием посевного материала, так и с групповым. Это связано с тем, что вертикальный поток технически разделить легче (в сравнении с горизонтальным).

Машины с данными системами высева можно разделить на два типа: сеялки и почвообрабатывающе-посевные агрегаты шириной захвата до 4 м и машины шириной захвата более 4 м. В машинах первого типа вертикальная колонна распределителя совмещена с питателем эжекторного типа. В машинах второго типа распределитель находится на некотором (до 4...6 м) удалении от питателя и имеет горизонтальный участок. В связи с этим характер работы распределительных устройств существенно отличается, что приводит к необходимости применения различных методов выравнивания материал-воздушного потока по сечению вертикального канала.

По принципу действия и конструктивному исполнению вертикальные распределители подразделяются на активные и пассивные. Наибольшее распространение в мировой практике получили вертикальные распределители пассивного действия, способные обслуживать до 48 сошников (рис. 1.19). Основное преимущество вертикальных распределителей состоит в том, что они просты по устройству и надежны в эксплуатации. Надежность протекания процесса распределения обеспечивается тем, что посевной материал в вертикальном канале находится в состоянии пневмотранспорта, а это значительно упрощает процесс распределения посевного материала по отводящим патрубкам. Существенным недостатком таких распределительных устройств является высокая неравномерность распределения посевного материала по сошникам, особенно при работе на склонах [71].

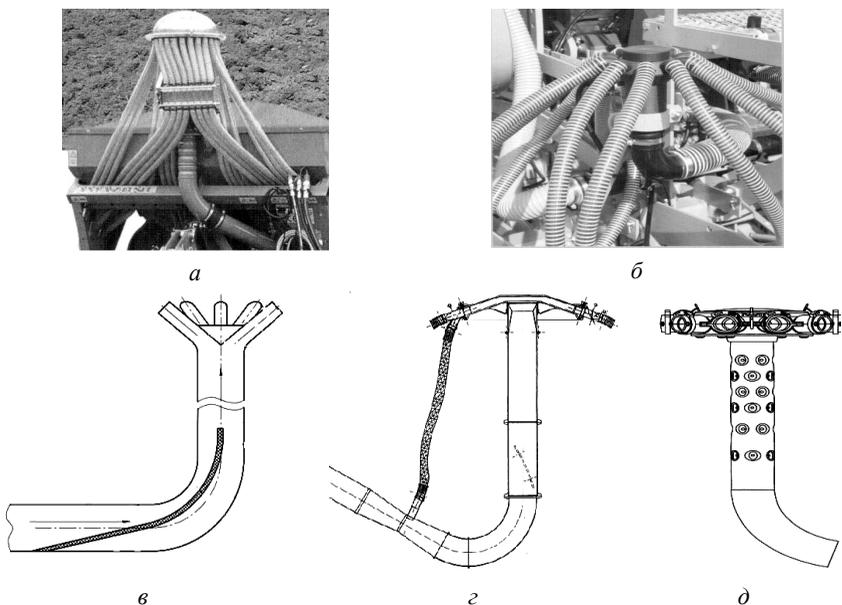


Рис. 1.19. Типы вертикальных распределителей пассивного действия:
a – Amazone; *б* – Lemken; *в* – Gaspardo; *г* – Horsch; *д* – Flexi-Coil

Повышением качества работы распределительных устройств занимались как в нашей стране, так и за рубежом. Известный ученый С. Г. Хаммонд [26], исследуя процесс распределения посевного материала в распределителе вертикального типа, предложил повысить симметричность двухкомпонентного потока в поперечном сечении пневмоматериалопровода, применив гофрированную форму вертикальной колонны. Данное техническое решение позволило существенно снизить неравномерность распределения посевного материала по семяпроводам.

В исследованиях Ф. Г. Зуева [72], А. М. Дзядзио [73], Г. Хеера [74] для устранения негативного влияния отвода на равномерность распределения посевного материала по семяпроводам в вертикальном распределительном устройстве было предложено стабилизировать поток, увеличив высоту вертикального участка колонны перед распределительной головкой до 20 диаметров самого пневмоматериалопровода. Такое решение на практике увеличивало не только материалоемкость системы, но и габариты всей сеялки, что затруднило переход из рабочего положения в транспортное.

Ученый Г. Пиппинг [75] после изучения влияния отвода на качество процесса распределения посевного материала по семяпроводам предложил использовать несколько подводящих пневмоматериалопроводов с целью обеспечения симметричной подачи семян. Однако данная конструкция не получила широкого применения, так как требовалось увеличение количества дозирующих устройств.

В своих исследованиях В. А. Насонов, М. С. Хоменко [21] предложили использовать вертикальный распределитель с верхней подачей посевного материала и отражатель, представляющий собой шарик, свободно подвешенный на нити по оси трубопровода. Применение данного решения позволило достичь неравномерности распределения семян по семяпроводам при высеве различных культур в пределах 4 %. Однако ввиду своей сложности предлагаемая конструкция широкого распространения не получила.

Заслуживают внимания работы А. В. Клочкова, который, исследуя качество распределения посевного материала в вертикальном распределителе, предложил улучшить его работу путем установки в распределительной головке активного направителя, приводимого во вращение за счет восходящего потока и более качественно распределяющего посевной материал по сошникам. Однако данное устройство имело ряд недостатков.

Исследованиями процесса распределения посевного материала в распределительных устройствах занимались К. К. Курилович [76], В. Г. Гусинцев [77], А. С. Сентюров [78], А. В. Адаш [59, 61], В. С. Астахов [31, 32, 33, 60], Н. Д. Лепешкин, Ю. Л. Салапура, А. А. Точицкий [55], В. В. Жук [64]. Разработанные ими устройства распределителей позволили получить неравномерность распределения посевного материала по семяпроводам зерновых и зернобобовых культур в пределах 2,8 %...4,5 %, что вполне допустимо. Данные распределители нашли применение в отечественных образцах сеялок и почвообрабатывающе-посевных агрегатах с пневматической системой высева. Однако предложенные решения использовались только в распределителях горизонтального типа.

Анализ результатов исследований и конструкций распределителей позволяет сделать вывод о том, что последние наиболее целесообразно применять в виде распределителей посевного материала вертикального типа в пневматических системах высева. Однако для обеспечения агротехнических требований по неравномерности распределения посевного материала по сошникам необходимо их конструктивное совершенствование [62].

С целью совершенствования процесса распределения посевного материала в проточном канале вертикальной колонны, отводе и распределительной головке размещают дополнительные элементы различного конструктивного исполнения (центраторы, турбулизирующие вставки и направлятели), повышающие турбулентность транспортирующего воздушного потока для создания более однородной материало-воздушной смеси по всему сечению, что обеспечивает более равномерное распределение посевного материала по сошникам (рис. 1.20).

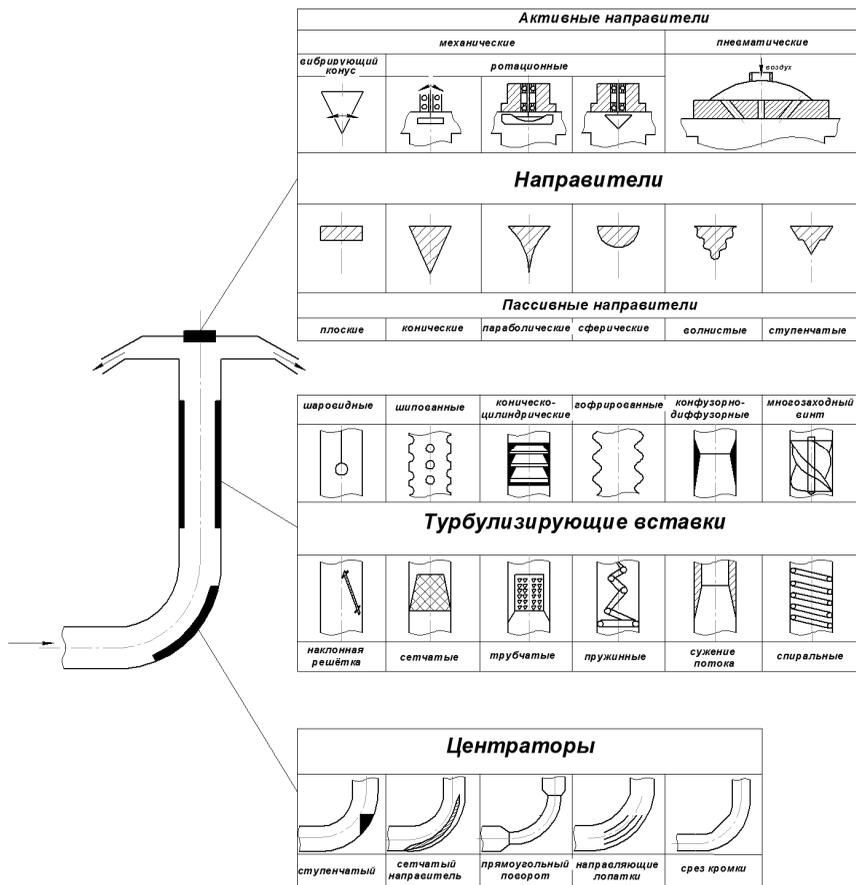


Рис. 1.20. Схемы дополнительных элементов для вертикальных распределительных устройств

Так, в отводе для повышения равномерности распределения посевного материала используются различного вида элементы: ступенчатые, сетчатые, в виде прямоугольного поворота, среза кромки и направляющих лопаток. Данные устройства (центраторы) позволяют подавать поток посевного материала в центр вертикальной колонны.

Вертикальная колонна дополняется различными по конструкции турбулизирующими вставками: шаровидными, шипованными, коническо-цилиндрическими, гофрированными, конфузорно-диффузорными, сетчатыми, трубчатыми, пружинными, спиральными, в форме наклонной решетки и сужения потока. Применение данных вставок способствует увеличению турбулентности потока и, соответственно, выравниванию концентрации частиц посевного материала по поперечному сечению вертикальной части распределителя, так как скорость семян после прохождения отвода снижается.

В распределительной головке устанавливаются направлятели, которые, снижая травмирование посевного материала (косое соударение), направляют его равномерно по отводящим патрубкам. Эти устройства также имеют различную геометрическую форму: плоскую, коническую, параболическую, сферическую, волнистую и ступенчатую. Особо следует отметить распределительные головки с активными направлятелями, которые бывают механическими, где в качестве основного рабочего органа выступают вибрирующие или ротационные элементы (лопасти, конусы), а также пневматическими, в которых воздушный поток воздействует на посевной материал.

Классификация дополнительных элементов, которые применяются в вертикальных распределительных устройствах, представлена в виде блок-схемы (рис. 1.21).

Как правило, применения только одного дополнительного элемента, повышающего равномерность распределения высеваемого материала в распределителях такого типа, бывает недостаточно. Большинство мировых производителей посевной техники с пневматическими системами высева применяют комплексно несколько рабочих элементов для снижения неравномерности распределения посевного материала по сошникам. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка комбинированного рабочего органа, обеспечивающего выравнивание посевного материала по поперечному сечению вертикальной части распределителя при минимальном аэродинамическом сопротивлении, а также применение направлятеля в распределительной головке для исключения травмирования посевного материала за счет снижения интенсивности и количества соударений семян.

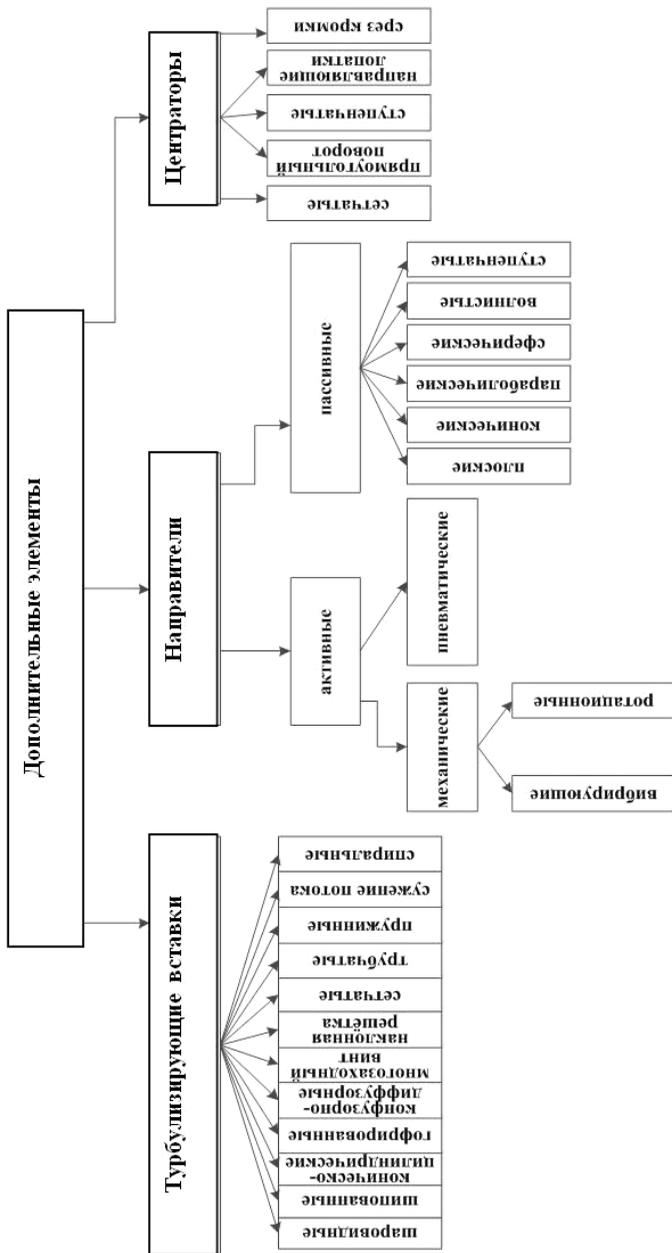


Рис. 1.21. Классификация дополнительных элементов для вертикальных распределительных устройств

1.5. Технологические схемы и элементы пневматических систем высева

К основным элементам пневматической системы высева относятся: вентилятор, дозатор, устройство для ввода материала в транспортирующий воздушный поток, пневмоматериалопроводы и распределители потока посевного материала.

Качественными показателями работы системы высева являются равномерность распределения посевного материала по поверхности поля и глубине его заделки, которая зависит от типа сошника, качества подготовки поля и рабочей скорости посевной машины. Эти факторы хорошо изучены, и результаты применены на практике. Дозирующие устройства также широко представлены в литературе и обоснованы для использования в различных системах высева [26, 27, 30, 31, 33].

Зависимость качества высева от операций ввода посевного материала в воздушный транспортирующий поток и распределение его по сошникам изучены недостаточно, поэтому необходимо рассмотреть устройства для выполнения этих операций, выявить их положительные и отрицательные стороны, определить направления конструктивного совершенствования и повышения их эффективности.

Питатели пневматической высевающей системы должны обеспечивать выполнение следующих требований [79]:

- непрерывную и равномерную подачу материала в материалопровод;
- минимальную утечку воздуха из пневмосистемы в атмосферу;
- минимальное энергопотребление;
- исключение травмирования материала;
- малое аэродинамическое сопротивление.

Конструктивное исполнение устройств для ввода посевного материала в пневмотранспортную сеть определяется типом применяемой системы высева. Она бывает герметичная (закрытая) и негерметичная (открытая). В первой системе за счет герметизации давление в бункере и зоне ввода материала в пневмоматериалопровод одинаковое. В таких системах поток семян от дозатора беспрепятственно поступает в пневмоматериалопровод и далее транспортируется к распределителям. Для поддержания стабильности давления в системе воздушный поток, создаваемый вентилятором, подается в бункер и дозатор.

Герметичные системы используются в основном на сеялках с шириной захвата 12...18 м: Sunflower (США); Morris, Concord AS-1002, Prasco 75-55 (Канада) [30]. В настоящее время они находят применение на сеялках и почвообрабатывающе-посевных агрегатах с шириной захвата 8 м и более.

Несмотря на кажущуюся простоту, герметичная система не лишена недостатков. Обеспечение герметичности конструкции всех элементов системы требует высокого технологического уровня и культуры производства. Кроме того, при изменении уровня семян в бункере устойчивость высева снижается, и требуется применение более производительных вентиляторов.

Эти недостатки отсутствуют в негерметичных системах высева, в которых для ввода посевного материала в пневмоматериалопровод используются специальные устройства в виде шлюзового затвора, шнекового или эжекторного питателя.

Питатели типа «шлюзовой затвор» широко применяются на мукомольных и комбикормовых заводах и торфоперерабатывающих предприятиях для пневматического транспортирования перерабатываемых материалов. Принцип работы данного устройства аналогичен работе желобчатой катушки с присущим для нее основным недостатком – пульсирующая подача материала [80].

В РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» был разработан экспериментальный образец такого питателя применительно к пневматической системе высева зерновой сеялки (рис. 1.22).

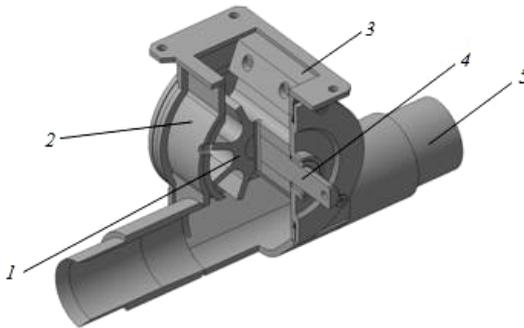


Рис. 1.22. Шлюзовый питатель зерновой пневматической сеялки:
1 – катушка; 2 – корпус; 3 – отсекабель; 4 – вал; 5 – трубопровод

Исследовательскими испытаниями выявлены следующие недостатки: порционность подачи материала; повышенное травмирование семян; возможность заклинивания катушки; необходимость точного изготовления для обеспечения минимального зазора между корпусом и катушкой; износ внутренней поверхности корпуса и ребер катушки.

Для более равномерной подачи материала можно увеличивать частоту вращения катушки. Однако при этом уменьшается коэффициент заполнения ячеек и возрастает утечка воздуха. Оптимальная частота вращения катушки должна находиться в пределах $0,3...0,7 \text{ с}^{-1}$ [72]. Выполнение этого условия требует применения специального привода, что значительно усложняет конструкцию посевной машины.

Для снижения утечек воздуха через зазор между корпусом и катушкой используют различные технические решения. Так, например, отсекатель 3 (см. рис. 1.22) выполняет функцию буфера и частично препятствует утечке воздуха через зазоры между катушкой и корпусом. При этом даже применение отсекателя из упругого материала не исключает заклинивания материала и его дробление. Щеточный отсекатель позволяет несколько снизить дробление и заклинивание материала, но недостаточно препятствует утечке воздуха. Предлагаются и другие варианты уплотнения (рис. 1.23): автоматические регуляторы зазора (рис. 1.23а, б), комбинированные катушки с уплотнителями на ребрах (рис. 1.23в), установка катушки в корпусе с эксцентриситетом (рис. 1.23г).

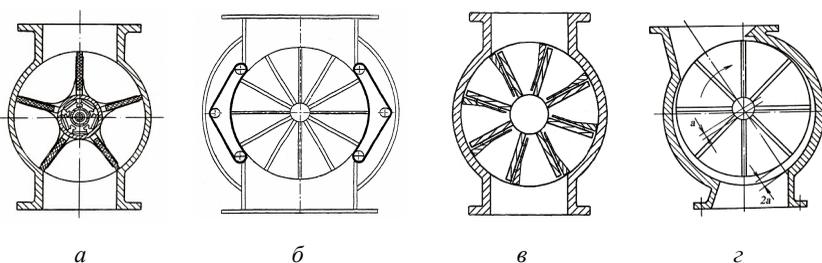


Рис. 1.23. Варианты герметизации питателей типа «шлюзовой затвор»

Однако имеющиеся недостатки не препятствовали применению питателей типа «шлюзовой затвор» на широкозахватных посевных машинах с централизованным дозированием посевного материала

вследствие достаточно высокой их производительности. Они устанавливались на сеялках Flexi Coil 1000 (Канада); Leon (S-45, S-75) и Symonds (Австралия).

Шнековые питатели находят применение в аэрозольтранспортных установках. Среди пневматических сеялок с данным типом питателей известны только Chinook 1203 (Австралия) и Bourgault 138 (Канада).

Шнековый питатель обеспечивает подачу материала в пневмоматериалопровод при сопротивлении сети до 5 кПа только при соответствующей длине запорной пробки материала. Величина утечки воздуха через питатель обратно пропорциональна длине запорной пробки, но увеличение ее длины требует большей мощности на привод питателя вследствие возрастания сил трения о стенки кожуха шнека при ее перемещении [81]. Поэтому шнековые питатели более энергоемки [79]. Мощность, необходимая для привода, расходуется на преодоление сил трения транспортируемого материала о поверхность шнека и его корпус и на преодоление противодавления в аэрокамере питателя [72]. Известно, что при 5%-й утечке воздуха через питатель его производительность снижается на 15 % [61].

Создание герметизации в шнековых питателях достигается различными конструктивными решениями: переменным шагом шнека, установкой обратного клапана, сужением кожуха шнека и др. Число витков шнека, как правило, равно восьми [61].

Для крупнозернистых материалов шнековые питатели малопригодны, так как невозможно обеспечить необходимую герметичность: через межзерновые пространства будет происходить утечка воздуха, наблюдается значительное дробление материала [72]. Основными преимуществами шнековых питателей являются равномерность подачи материала в материалопровод и высокая производительность [61]. Наиболее широкое применение в пневматических высевальных системах зерновых сеялок зарубежного и отечественного производства нашли питатели эжекторного типа (на импортных агрегатах фирм Accord, Lemken, Amazone, Rabewerk, Kuhn, Horsch; на отечественных посевных машинах С-6, С-6Т и СПУ, АПП-6).

Эжекторный питатель (рис. 1.24) представляет собой аэродинамическое устройство, состоящее из соосно расположенных частей, – суживающейся (конфузора) и расширяющейся (диффузора), которые

отстоят друг от друга на определенное расстояние, образующее камеру смешения. В этой камере вследствие увеличения скорости воздушного потока создается давление, равное атмосферному или меньше его (разрежение), что позволяет беспрепятственно вводить посевной материал в транспортирующий поток.

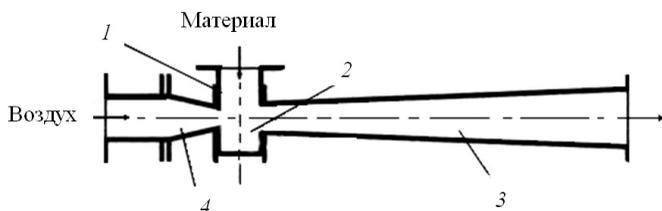


Рис. 1.24. Схема питателя эжекторного типа:

1 – загрузочная горловина; 2 – камера смешения; 3 – диффузор; 4 – конфузор

Эжекторный питатель по принципу действия относится к устройствам струйного типа. При оптимальном соотношении геометрических параметров эжектора и определенной характеристике воздушного потока обеспечивается равномерное (без пульсаций) транспортирование посевного материала.

Результатами экспериментальных исследований и производственных испытаний выявлен ряд недостатков этих устройств: непостоянство параметров воздушного потока при колебании оборотов двигателя трактора (в случае привода вентилятора от ВОМ трактора); необходимость равномерного ввода посевного материала по сечению загрузочной горловины [82]; низкий КПД (0,5...0,7) [72].

Первый недостаток в настоящее время довольно эффективно устраняется установкой гидропривода вентилятора или автономного двигателя внутреннего сгорания (чаще всего применяется на сеялках с большой шириной захвата), что приводит к удорожанию конструкции.

Второй недостаток в достаточной мере исключается применением в качестве дозатора катушек со спиральными или скошенными желобками, а также установкой выравнивателей потока высеваемого материала между дозатором и питателем [83, 84].

Наиболее сложным является повышение КПД этих устройств. Авторами работ [73, 85, 86] предлагается для пневмотранспорта зерна в системах с давлением до 5 кПа использовать эжекторный

питатель с классической компоновкой «конфузор–камера смешения–диффузор» с прямоугольной, квадратной или цилиндрической формой поперечного сечения (рис. 1.25). При этом с целью снижения потерь угол сужения конфузора должен быть не более 20° , а угол расширения диффузора – не более 8° , без указания оптимальных их значений и формы. Между тем при угле раскрытия диффузора больше 12° коэффициент внутренних потерь квадратного диффузора в 2 раза больше, чем конического. Отмеченное различие объясняется большим периметром квадратного диффузора, что связано с различным характером течения воздушного потока в отрывных зонах прямоугольного и конического диффузора [87]. Поэтому выбор формы поперечного сечения имеет немаловажное значение.



а



б



в



г

Рис. 1.25. Питатели эжекторного типа с различной формой поперечного сечения: *а* – питатель фирмы Kuhn (Франция); *б* – питатель фирмы Amazone (Германия); *в* – питатель фирмы Horsch (Германия); *г* – питатель сеялки С-6Т (Республика Беларусь)

Часть работ по совершенствованию эжекторных питателей направлена на придание посевному материалу при вводе его в пневмотранспортную магистраль начальной скорости, совпадающей с направлением транспортирования. Известно, что на разгон материала в пневмоматериалопроводе до скорости его транспортирования расходуется до 35 %...40 % давления воздушного потока [88].

Для снижения этих энергозатрат учеными Белорусской ГСХА [77] предлагается перед загрузочной горловиной устанавливать механический ускоритель семян щеточного типа. Применение в питателе скатной доски предложено М. Н. Карягдыевым [79]; В. И. Скорляков [89] указывает на возможность совмещения корпуса дозатора с питателем, что позволит семенам сходить с желобков катушки с некоторой начальной скоростью в направлении потока. Загрузочную воронку с криволинейной стенкой (см. рис. 1.25 ϵ), обеспечивающей ввод посевного материала в воздушный поток под углом менее 90° , рекомендует использовать В. С. Астахов [24].

Однако применение таких устройств возможно только в питателях с квадратным, прямоугольным или эллипсовидным поперечным сечением, что требует для их изготовления определенных и довольно сложных технологий и оборудования. В то же время применение этих устройств не оказывает существенного влияния на повышение пропускной способности.

Известен также питатель комбинированного типа (рис. 1.26) [90], в котором катушечный дозатор совмещен с эжектором, и расстояние между ребрами катушки и воздушным потоком минимальные. Однако на серийных посевных машинах эти предложения не нашли широкого применения по причине усложнения конструкции и незначительной эффективности. Несмотря на имеющиеся недостатки, эжекторные питатели с цилиндрической формой поперечного сечения не исчерпали своего потенциала и являются наиболее приемлемыми применительно к пневматическим высевным системам. Они просты по устройству, малогабаритны, не требуют отдельного привода, технологичны в изготовлении, не вызывают травмирование материала.

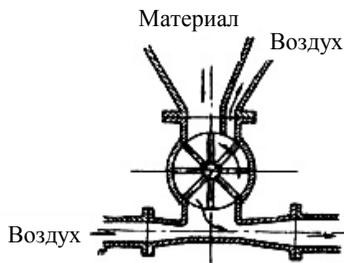


Рис. 1.26. Питатель комбинированного типа

Однако для улучшения их эксплуатационных характеристик необходимо провести дополнительные исследования [6, 91, 92].

Анализ теоретических исследований газодинамических процессов в эжекторных системах показывает, что повышение КПД эжекторного питателя возможно за счет его рациональных геометрических

параметров проточной части и их соотношения между собой [93, 94]. Для определения этих параметров применительно к питателям эжекторного типа для посевных машин необходимо провести дополнительные исследования.

Распределители посевного материала являются неотъемлемым элементом пневматической системы высева при централизованном и групповом дозировании посевного материала. От качественного выполнения их функционального назначения зависит равномерность распределения семян по сошникам.

По принципу действия и по конструктивному исполнению они подразделяются на следующие типы [95]:

- вертикальные распределители активного действия;
- вертикальные распределители пассивного действия;
- горизонтальные распределители активного действия;
- горизонтальные распределители пассивного действия.

В распределителях активного действия применяются вращающиеся элементы в виде конуса (рис. 1.27) или крыльчатки (рис. 1.28). Приводятся в движение они в основном воздушным потоком.

Принцип действия заключается в следующем: посевной материал воздушным потоком во взвешенном состоянии подается на вращающиеся поверхности, расположенные под некоторым (менее 90°) углом к направлению движения материала. Вследствие косоугольного соударения происходит его разбрасывание и направление в семяпроводы.

Эти распределители обеспечивают довольно качественное распределение. Так, на пневматической сеялке СПУ с активным конусным распределителем на высева озимой ржи коэффициент вариации был равным 4,1 % [22]. Так как равномерность и стабильность распределения зависит от частоты вращения, то необходимо поддержание воздушного потока с определенными постоянными параметрами. Это требование в производственных условиях, особенно с приводом вентилятора от ВОМ трактора, выполнить практически невозможно. Кроме того, не исключается травмирование и дробление семян. Возможно также торможение и заклинивание вращающихся элементов вследствие запыленности и коррозионной активности посевного материала, требуется вентилятор большей производительности.

Поэтому повышаются требования к конструкционному материалу и точности изготовления. По этим причинам распределители активного действия широкого применения не нашли.

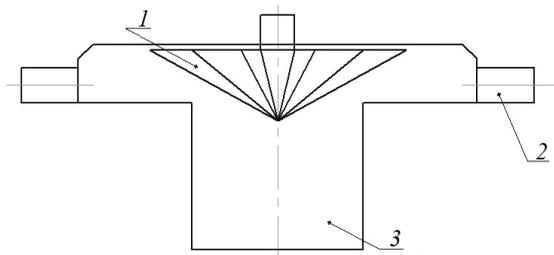


Рис. 1.27. Схема распределителя с конусом:

1 – вращающийся конус; 2 – штуцера семяпроводов; 3 – подводящая труба

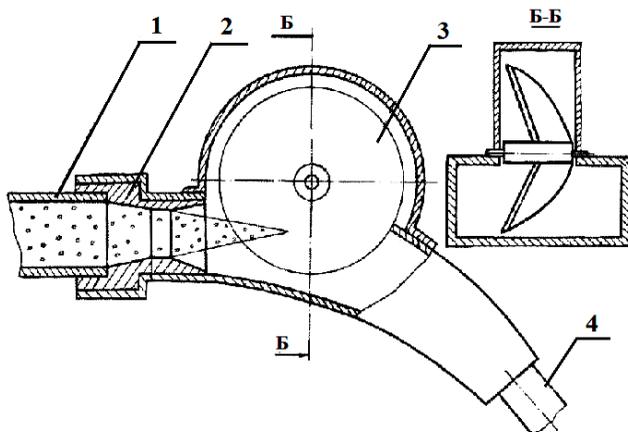


Рис. 1.28. Схема распределителя с крыльчаткой:

1 – материалопровод; 2 – насадок; 3 – волнообразная крыльчатка; 4 – семяпровод

Наибольшее распространение в мировой практике получили вертикальные распределители пассивного действия, разработанные немецкой фирмой Н. Weiste [96]. Основное их преимущество состоит в простоте устройства и надежности в эксплуатации. Суть процесса распределения состоит в том, что посевной материал в вертикальном канале находится в псевдосжиженном состоянии, что значительно упрощает процесс равномерного распределения

посевного материала по отводящим патрубкам. Основным существенным недостатком таких распределительных устройств является зависимость неравномерности распределения от наклона вертикального канала при работе на склонах. Так, наклон до 15° в любую сторону приводит к увеличению коэффициента вариации до 12 %...18 % [71] против 5 % по агротребованиям. Для повышения равномерности распределения материала в крышке таких распределителей размещают различные конструктивные элементы [97].

Для этой же цели в подводящую колонну устанавливают дополнительные рабочие органы (выравниватели), которые можно разделить на турбулизирующие и центрирующие (см. рис. 1.28) [71]. Принцип действия первых основан на отражательном действии, при котором материал хаотически перемешивается в поперечном сечении и поступает более равномерно на распределительную поверхность, повышая равномерность распределения в целом (данные предпосылки отмечены в работе [98]). В качестве отражающих элементов используются конические кольца, конусы, установленные друг за другом (рис. 1.29а), гофры на внутренней поверхности вертикального трубопровода (рис. 1.29б). Аналогичную функцию выполняют и направители потока, размещаемые в месте перехода материалопровода с горизонтального участка на вертикальный (рис. 1.29в).

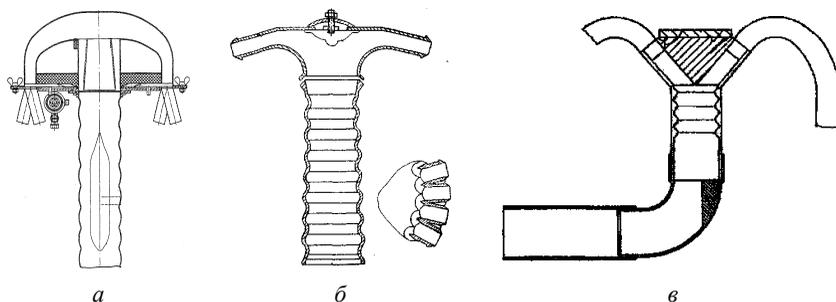


Рис. 1.29. Типы вертикальных распределителей пассивного действия:
a – Amazone; *б* – Accord; *в* – Lemken

Принцип действия вторых основан на повышении равномерности за счет точного направления потока материаловоздушной смеси на конический делитель, установленный в центре крышки распределительной головки. Для этого внутри вертикального материалопровода

провода помещаются специальные элементы – центраторы. Среди них можно выделить сетчатый центратор (рис. 1.30а), трубчатый центратор с отверстиями типа «грешпель» (рис. 1.30б), а также трубчатый центратор с находящейся в нем спиралью (рис. 1.30в) [71].



Рис. 1.30. Типы центраторов посевного материала

Однако применения только одного способа, повышающего равномерность распределения высеваемого материала в распределителях такого типа, недостаточно, поэтому на практике применяется комбинированный способ. Так, фирмой Amazone (Германия) применяется гофрированная боковая поверхность вертикального канала с коническим направителем потока материала в сочетании с отражающей сферической поверхностью большого радиуса (см. рис. 1.29а) [99]. Фирма Lemken (Германия) предлагает вместе с гофрированной турбулизирующей поверхностью использовать и конусный делитель, расположенный в центре делительной головки (см. рис. 1.29в) [100]. Фирма Kverneland (Швеция) на сеялках Accord для этих целей использует сферические отражатели, расположенные непосредственно на стенках вертикального канала.

Широкое распространение в последние годы получили распределители горизонтального типа пассивного действия, применение которых позволило решить проблему повышения равномерности распределения материала при работе на склоновых землях. Такие распределители установлены на отечественных сеялках С-6, агрегатах Morris (Канада) и «Сириус-10» (Украина). Фирма Morris (Канада) на своих посевных машинах применяет горизонтальные распределители посевного материала (рис. 1.31), выполненные в виде длинного плоского расширяющегося раструба, на внутренней поверхности которого имеются также своего рода турбулизаторы.

Ввод материала

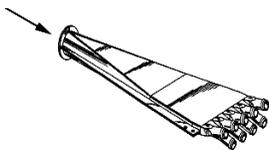


Рис. 1.31. Горизонтальный распределитель фирмы Morris

Перед входом в распределитель устанавливается еще и гофрированная труба для стабилизации и выравнивания материаловоздушного потока по сечению материалопровода на входе [101].

Длина трубы составляет приблизительно один метр. Аналогичные распределители установлены на сеялке-культиваторе «Сириус-10» (Украина) [102].

В пневматических сеялках, разрабатываемых в Республике Беларусь, нашли применение горизонтальные распределители конструкции Белорусской ГСХА (рис. 1.32), принцип действия которых основан на отражении семян от сферических отражателей на верхней внутренней поверхности, повышающих равномерность распределения посевного материала по сечению перед выходом в семяпроводы. Впервые исследования распределителей горизонтального типа со сферическими отражателями применительно к зерновым культурам выполнены А. С. Сентюровым [103].

Преимущества распределителей такого типа следующие: до минимума сводятся лобовые соударения посевного материала с отражательной поверхностью, что значительно снижает его травмирование и дробление (особенно при высеве гороха и люпина, а также гранулированных минеральных удобрений); компактность; простота устройства и малая энергоемкость [95]. Поэтому в перспективе предполагается возможность применения их при высеве совместно с зерном и припосевной (стартовой) дозы гранулированных минеральных удобрений.

В Белорусской ГСХ проведены исследования высоконагруженного распределителя (рис. 1.33) [52], принцип действия которого основан на двухступенчатом выравнивании, позволяющем эффективнее использовать отражающую поверхность и повысить равномерность распределения. Недостатками распределителей горизонтального типа является их конструктивная ограниченность в количестве обслуживаемых сошников (не более 12 – в агрегатах Morris).

Распределители горизонтального типа требуют выровненного по сечению потока материаловоздушной смеси на входе. Для этого

необходимо наличие прямого горизонтального участка перед распределителем, равного 8...10 диаметрам материалопровода [72], что составляет 500...600 мм и более. В существующих посевных машинах реализация такого конструктивного предложения оказывается невозможной по компоновочным требованиям. Представленный анализ распределителей посевного материала пневматических сеялок позволяет сделать вывод о том, что с целью снижения энергоемкости системы, а также упрощения конструкции посевной машины, наиболее целесообразно применение распределителей потока посевного материала горизонтального типа при групповом дозировании [104].

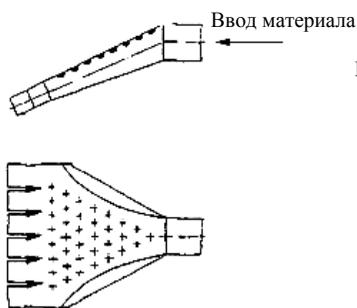


Рис. 1.32. Горизонтальный распределитель конструкции Белорусской ГСХА

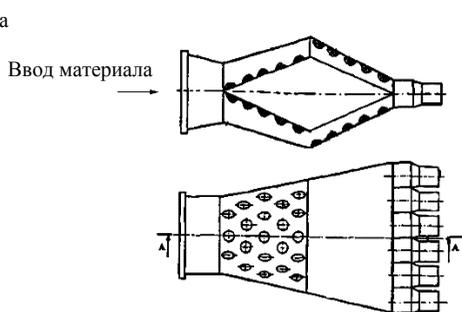


Рис. 1.33. Схема высоконагруженного распределителя

Все типы устройств имеют существенный недостаток – для качественного выполнения процесса необходимо равномерное размещение посевного материала по поперечному сечению материалопровода перед вводом его в распределитель [105].

В связи с этим особую актуальность приобретает разработка конструктивно простого устройства, обеспечивающего выравнивание посевной смеси материала по сечению материалопровода и обладающего малым сопротивлением.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВЫСЕВА ПОСЕВНОГО МАТЕРИАЛА

2.1. Аэродинамические основы пневматического транспортирования материала

На процесс устойчивого транспортирования двухкомпонентной полидисперсной смеси (семена и минеральные удобрения) в сеялках с пневматической системой высева основное влияние оказывает концентрация смеси μ , определяемая отношением массовых расходов посевного материала (твёрдой фазы) и воздуха.

Под устойчивым транспортированием понимается такая скорость перемещения материала, при которой исключается выпадение его из потока и перемещение по дну трубопровода, т. е. на границе «завала» [106].

Это достигается увеличением расхода воздуха, т. е. снижением значения коэффициента μ , что не всегда возможно по конструктивным причинам (ограничения по площади поперечного сечения материалопровода, его длины и пр.) и из-за отсутствия источников воздушного потока с необходимой производительностью и давлением. Поэтому необходимо определение оптимальной концентрации для каждого технологического процесса. Так, для пневмотранспортеров-перегрузателей зерна с шлюзовыми питателями $\mu = 3 \dots 4$; для сеялок централизованного высева $\mu = 2,0 \dots 2,5$. При больших значениях наблюдается осаждение транспортируемых материалов, приводящее к завалу пневмосети [107]. Это обстоятельство необходимо учитывать и при расчете пневматической системы высева зернутоковых сеялок, так как падение скорости транспортирования отрицательно сказывается на распределении посевного материала в распределителе и увеличивает неравномерность распределения его по сошникам.

Критическое значение концентрации смеси определяется из уравнения энергии для движущегося материаловоздушного потока [108]:

$$\left(\frac{Q_{CM}}{Q_{Вент}} \right)^c R_0 (1 + \mu) L_M = R_0 L_M, \quad (2.1)$$

где c – показатель степени, равный 2 – для режима движения потока с сильно развитой турбулентностью, 1,75 – со слабо развитой; Q_{CM} и $Q_{Вент}$ – производительность вентилятора при транспортировке смеси воздуха с материалом и чистого воздуха соответственно, м³/ч; R_0 – удельное гидравлическое сопротивление при движении чистого воздуха, Па/м; L_M – длина транспортирования материала, м.

После преобразования уравнения (2.1) получают функциональные зависимости между количеством транспортируемого воздуха и весовой концентрацией материала:

$$Q_{CM} = \frac{Q_B}{\sqrt[k]{(1+\mu)}}, \quad (2.2)$$

$$w_{CM} = \frac{w_B}{\sqrt[k]{(1+\mu)}}, \quad (2.3)$$

где w_{CM} и w_B – средние скорости движения потока смеси воздуха с материалом и чистого воздуха соответственно, м/с.

Из выражений (2.2) и (2.3) значение критической концентрации материала определяют по формуле

$$\mu_{кр} = \left(\frac{w_B}{w_{CM}} \right)^c - 1. \quad (2.4)$$

Еще одним значимым фактором, влияющим на процесс пневматического транспортирования материала, является коэффициент удельного падения давления [106]

$$\Pi = \left(\frac{P_{CM}}{P_B} \right), \quad (2.5)$$

где P_{CM} – потери давления на трение и местные сопротивления для материаловоздушной смеси, Па; P_B – потери давления на трение и местные сопротивления для воздуха, Па.

Аналитическое выражение для удельного падения давления впервые было дано И. Гастерштадтом [109] и впоследствии развито В. И. Колычевым, согласно исследованиям которого:

$$\Pi = 1 + S_p \mu, \quad (2.6)$$

где S_p – коэффициент удельного падения давления, зависящий от формы, удельного веса, размеров и влажности материала, концентрации смеси, скорости воздуха, диаметра трубопровода.

Условия, при которых рассматриваемые факторы оказывают существенное влияние, называются стесненными. Они оцениваются отношением эквивалентного диаметра частиц транспортируемого материала к диаметру трубопровода и концентрации материало-воздушной смеси. Частицы в таких условиях витают при меньшей скорости воздуха.

Скорость витания в стесненных условиях зависит от аэродинамических свойств транспортируемого материала. Для материалов, состоящих из сложной смеси большого количества различных по форме, размерам и другим показателям частиц, за скорость витания смеси принимается скорость витания самой тяжелой фракции. Скорость также зависит и от условий обтекания этих частиц, ориентации их в транспортирующем потоке и других факторов.

Скорость витания в стесненных условиях может быть определена по формуле В. А. Успенского [110]:

$$w_{\text{вит}} = 0,8 \sqrt{\frac{4gd_{\text{ч}}(\rho_{\text{М}} - \rho_{\text{В}})}{3K_3\rho_{\text{В}}} \left[1 - \left(\frac{d_{\text{ч}}}{D} \right)^2 \right]}, \quad (2.7)$$

где K_3 – коэффициент запаса, $K_3 = 1,20 \dots 1,25$.

Зная скорость витания материала, можно определить скорость воздушного потока, необходимую для перемещения его в пневмоматериалопроводе высевающей системы:

$$w_{\text{В}} = \eta w_{\text{вит}}, \quad (2.8)$$

где η – безразмерный коэффициент, зависящий от пространственного расположения транспортной линии, свойств транспортируемого материала, концентрации смеси.

Так, по данным ВНИИЗ [110], скорость воздушного потока в трубопроводе может быть определена из выражения:

$$w_B = K(10,5 + 0,57w_{\text{вит}}). \quad (2.9)$$

На основании расчетных значений скорости витания частиц транспортируемого материала можно определить скорость его перемещения на горизонтальном участке пневмоматериалопровода [110]:

$$w_M = 0,85w_{\text{вит}}. \quad (2.10)$$

Таким образом, приведенные зависимости позволяют определять необходимые скорость транспортирующего воздушного потока и скорость перемещения посевного материала.

На основании изложенных основ теории пневмотранспортирования необходимо провести теоретический анализ функциональных свойств всех составляющих элементов выбранной схемы системы высева для обоснования их конструктивных параметров, обеспечивающих выполнение посева в соответствии с агротехническими требованиями.

2.2. Анализ движения частицы посевного материала в отводе распределительного устройства пневматической системы высева

При движении двухкомпонентного потока по криволинейному участку (отводу) канала происходит изменение его структуры, что выражается в перераспределении локальных давлений и скоростей воздуха по сечению потока: скорость убывает с увеличением радиуса кривизны, следовательно, давление у внутренней стенки меньше, чем у внешней. При входе в отвод у внутренней стенки образуется конфузورный участок, а у внешней – диффузорный, в то время как при выходе из отвода в вертикальную колонну у внутренней стенки образуется диффузорный участок, а у внешней – конфузорный. В диффузорных областях криволинейного участка наблюдается интенсивный рост пограничного слоя, который неустойчив и легко отрывается от стенки канала (рис. 2.1) [111].

Анализ схемы показал, что наличие местных отрывов приводит к нарушению однородности поля скоростей на выходе из отвода, что не может не отразиться на равномерности распределения посевного материала по всему поперечному сечению вертикальной колонны.

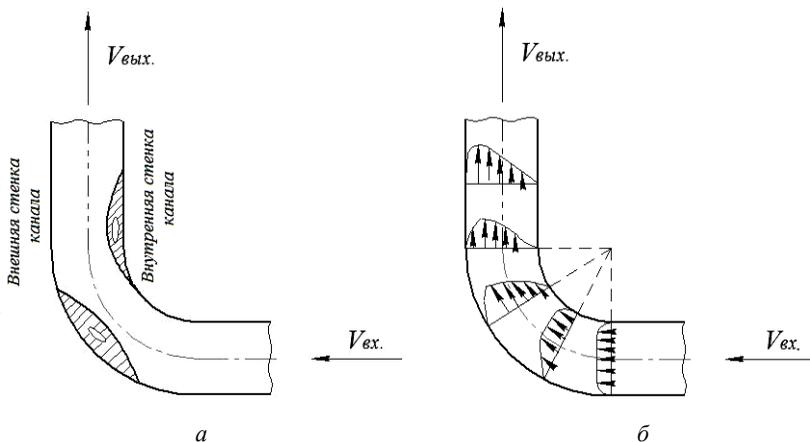


Рис. 2.1. Области отрыва потока (а) и поля скоростей в отводе (б)

Определим величину снижения скорости частицы при движении по отводу. При движении на данном участке на частицу будут действовать сила тяжести G , реакция связи N , сила трения $F_{тр}$ и аэродинамическая сила P_B (рис. 2.2).

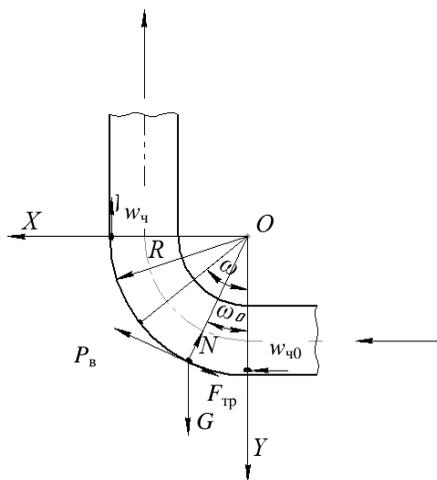


Рис. 2.2. Изменение скорости частицы при ее движении в отводе

После использования дифференциальных уравнений в естественной системе координат, уравнение движения частицы в отводе,

изменяющем направление с горизонтали на вертикаль, примет следующий вид:

$$\begin{cases} m \frac{dw_{\text{ч}}}{dt} = -F_{\text{тр}} - G \sin \omega + P_{\text{в}}, \\ m \frac{w_{\text{ч}}^2}{R} = N - G \cos \omega, \end{cases} \quad (2.11)$$

где m – масса частицы, кг; $w_{\text{ч}}$ – скорость частицы, м/с; $F_{\text{тр}}$ – сила трения, Н; G – сила тяжести, Н; ω – текущее значение угла поворота, град.; $P_{\text{в}}$ – аэродинамическая сила, Н; R – внешний радиус стенки отвода, по которой скользит частица, м; N – реакция связи, Н.

Из уравнения (2.11) имеем:

$$N = m \frac{w_{\text{ч}}^2}{R} + G \cos \omega.$$

Тогда сила трения

$$F_{\text{тр}} = \left(m \frac{w_{\text{ч}}^2}{R} + G \cos \omega \right) f_{\text{тр}}. \quad (2.12)$$

Подставив в уравнение (2.11) выражение (2.12) для $F_{\text{тр}}$, имеем:

$$m \frac{dw_{\text{ч}}}{dt} = -f_{\text{тр}} \left(m \frac{w_{\text{ч}}^2}{R} + G \cos \omega \right) - G \sin \omega + P_{\text{в}}. \quad (2.13)$$

Величину аэродинамической силы при турбулентном движении можно определить по известному выражению [72]:

$$P_{\text{в}} = \frac{k_{\text{с}} A \rho_{\text{в}} (w_{\text{в}} - w_{\text{ч}})^2}{2}, \quad (2.14)$$

где $k_{\text{с}}$ – безразмерный коэффициент сопротивления частицы воздушному потоку; A – площадь проекции частицы на плоскость, нормальную к потоку воздуха (миделево сечение), м²; $w_{\text{в}}$ – скорость воздушного потока, м/с.

С другой стороны:

$$k_c = \frac{2k_{\pi} m}{A\rho_B}, \quad (2.15)$$

где k_{π} – коэффициент парусности, m^{-1} .

Подставив величину коэффициента сопротивления в формулу (2.14), имеем:

$$P_B = k_{\pi} m (w_B - w_{\text{ч}})^2. \quad (2.16)$$

Далее подставим P_B в уравнение (2.13), считая, что в выражении для определения аэродинамической силы скорость транспортирования в 1,55 раза больше скорости витания, а также сократим массу m . Уравнение примет следующий вид:

$$\frac{dw_{\text{ч}}}{dt} = -\frac{f_{\text{тр}}}{R} w_{\text{ч}}^2 - f_{\text{тр}} g \cos \omega - g \sin \omega + k_{\pi} 0,3 w_B^2. \quad (2.17)$$

Приведем уравнение (2.17) к новой переменной – угловой координате ω :

$$\frac{w_{\text{ч}} dw_{\text{ч}}}{dt} = -f_{\text{тр}} w_{\text{ч}}^2 - (f_{\text{тр}} R g \cos \omega + R g \sin \omega - k_{\pi} R 0,3 w_B^2). \quad (2.18)$$

Решая уравнение (2.18) по способу Бернулли, делаем замену переменной $U = w_{\text{ч}}^2$, $dU = 2 w_{\text{ч}} dw_{\text{ч}}$, откуда имеем:

$$\frac{dU}{d\omega} = -2 f_{\text{тр}} U - 2(f_{\text{тр}} R g \cos \omega + R g \sin \omega - k_{\pi} R 0,3 w_B^2).$$

После переноса одного множителя в левую часть получим линейное уравнение:

$$\frac{dU}{d\omega} + 2 f_{\text{тр}} U = -2(f_{\text{тр}} R g \cos \omega + R g \sin \omega - k_{\pi} R 0,3 w_B^2).$$

Найдем интеграл, применив способ интегрирующего множителя [112]:

$$\begin{aligned}
U &= e^{-\int 2f_{\text{тп}} d\omega} \left[-1 \int (2f_{\text{тп}} R g \cos \omega + 2R g \sin \omega - 2k_{\text{н}} R 0,3w_{\text{в}}^2) \times \right. \\
&\quad \left. \times e^{\int 2f_{\text{тп}} d\omega} d\omega + C \right] = e^{-2f_{\text{тп}}\omega} \left[-2f_{\text{тп}} R g \int e^{2f_{\text{тп}}\omega} \cos \omega d\omega - \right. \\
&\quad \left. -2Rg \int e^{2f_{\text{тп}}\omega} \sin \omega d\omega + 0,6k_{\text{н}} R w_{\text{в}}^2 \int e^{2f_{\text{тп}}\omega} d\omega + C \right] = \quad (2.19) \\
&= e^{-2f_{\text{тп}}\omega} \left[-2f_{\text{тп}} R g \frac{e^{2f_{\text{тп}}\omega}}{4f_{\text{тп}}^2 + 1} (2f_{\text{тп}} \cos \omega + \sin \omega) - \right. \\
&\quad \left. -2Rg \frac{e^{2f_{\text{тп}}\omega}}{4f_{\text{тп}}^2 + 1} (2f_{\text{тп}} \sin \omega - \cos \omega) + \frac{0,3k_{\text{н}} R w_{\text{в}}^2}{f_{\text{тп}}} e^{2f_{\text{тп}}\omega} + C \right],
\end{aligned}$$

где C – постоянная интегрирования, которую определяем из начальных условий при $U = w_{\text{ч}0}$ и $\omega = 0$:

$$\begin{aligned}
C &= w_{\text{ч}0} + \frac{(2f_{\text{тп}})^2 R g}{4f_{\text{тп}}^2 + 1} - \frac{2Rg}{4f_{\text{тп}}^2 + 1} - \frac{2R P_{\text{в}}}{m 2f_{\text{тп}}} = \quad (2.20) \\
&= w_{\text{ч}0} + \frac{2Rg(2f_{\text{тп}}^2 - 1)}{4f_{\text{тп}}^2 + 1} - \frac{k_{\text{н}} R 0,3w_{\text{в}}^2}{f_{\text{тп}}}.
\end{aligned}$$

Подставив значение постоянной интегрирования в уравнение (2.19), получим:

$$\begin{aligned}
U &= \frac{2Rg}{4f_{\text{тп}}^2 + 1} \left[(2f_{\text{тп}}^2 - 1) \cos \omega + 3f_{\text{тп}} \sin \omega \right] + \frac{k_{\text{н}} R 0,3w_{\text{в}}^2}{f_{\text{тп}}} + \frac{C}{e^{2f_{\text{тп}}\omega}} = \\
&= \frac{2Rg}{4f_{\text{тп}}^2 + 1} \left[(1 - 2f_{\text{тп}}^2) \cos \omega - 3f_{\text{тп}} \sin \omega \right] + \frac{k_{\text{н}} R 0,3w_{\text{в}}^2}{f_{\text{тп}}} + \quad (2.21) \\
&\quad + \frac{w_{\text{ч}0}}{e^{2f_{\text{тп}}\omega}} - \frac{2Rg(1 - 2f_{\text{тп}}^2)}{(4f_{\text{тп}}^2 + 1)e^{2f_{\text{тп}}\omega}} - \frac{k_{\text{н}} R 0,3w_{\text{в}}^2}{f_{\text{тп}} e^{2f_{\text{тп}}\omega}}.
\end{aligned}$$

И окончательно для поворота с горизонтали на вертикаль, учитывая, что $\sqrt{U} = w_{\text{ч}}$, получим:

$$w_{\text{ч}} = \sqrt{\frac{w_{\text{ч}0}^2}{e^{2f_{\text{тп}}\omega}} - \frac{2Rg}{4f_{\text{тп}}^2 + 1} \left[\frac{1 - 2f_{\text{тп}}^2}{e^{2f_{\text{тп}}\omega}} - (1 - 2f_{\text{тп}}^2) \cos \omega + 3f_{\text{тп}} \sin \omega \right] + \frac{k_{\text{н}} R 0,3w_{\text{в}}^2}{f_{\text{тп}}} (1 - \frac{1}{e^{2f_{\text{тп}}\omega}})}. \quad (2.22)$$

При повороте двухкомпонентного потока с горизонтали на вертикаль на угол 90° величину конечной скорости частицы определим из выражения

$$w_{\text{ч}} = \sqrt{\frac{w_{\text{ч0}}^2}{e^{f_{\text{тр}}\pi}} - \frac{2Rg}{4f_{\text{тр}}^2 + 1} \left[\frac{1 - 2f_{\text{тр}}^2}{e^{f_{\text{тр}}\pi}} + 3f_{\text{тр}} \right] + \frac{k_{\text{н}}R0,3w_{\text{в}}^2}{f_{\text{тр}}} \left(1 - \frac{1}{e^{f_{\text{тр}}\pi}} \right)}. \quad (2.23)$$

Для распределительного устройства при угле поворота воздушного потока на угол 70° и при радиусе кривизны $R = 0,4$ м уравнение (2.22) принимает вид:

$$w_{\text{ч}} = \sqrt{\frac{w_{\text{ч0}}^2}{e^{2,44f_{\text{тр}}}} - \frac{0,8g}{4f_{\text{тр}}^2 + 1} \left[\frac{1 - 2f_{\text{тр}}^2}{e^{2,44f_{\text{тр}}}} - 0,63(1 - 2f_{\text{тр}}^2) + 2,3f_{\text{тр}} \right] + \frac{k_{\text{н}}R0,3w_{\text{в}}^2}{f_{\text{тр}}} \left(1 - \frac{1}{e^{2,44f_{\text{тр}}}} \right)}. \quad (2.24)$$

На основании полученных уравнений построены графики изменения скорости движения частиц посевного материала после отвода при различных коэффициентах трения при радиусе кривизны $R = 1$ м, для зерновых и зернобобовых культур $f = 0,3 \dots 0,5$ (рис. 2.3 и 2.4) [72].

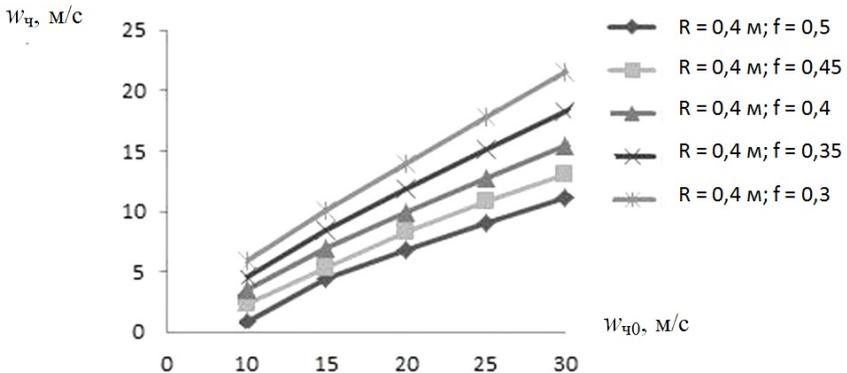


Рис. 2.3. График зависимости изменения скорости семян зерновых и зернобобовых культур за отводом от скорости семян перед отводом при различных коэффициентах трения

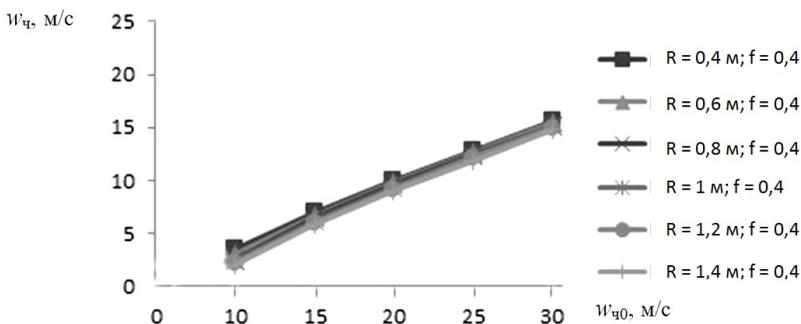


Рис. 2.4. График зависимости изменения скорости семян зерновых и зернобобовых культур за отводом от скорости семян перед отводом при различных радиусах кривизны

Анализ графических зависимостей, представленных на рис. 2.3 и 2.4, показывает, что существенное влияние на скорость семян при движении по отводу оказывает коэффициент трения. Чем он больше, тем больше теряется и скорость семян при выходе из отвода. Так, при входной скорости 28 м/с, радиусе кривизны 1 м и коэффициенте трения 0,5 скорость на выходе из отвода в 2...2,5 раза меньше, чем на входе, что ведет к уменьшению числа Re и общему снижению турбулентности потока. На рис. 2.5 представлена графическая зависимость изменения скорости зерновых и зернобобовых культур за отводом от скорости семян перед отводом при различных поворотах воздушного потока для базового и предполагаемого распределителя.

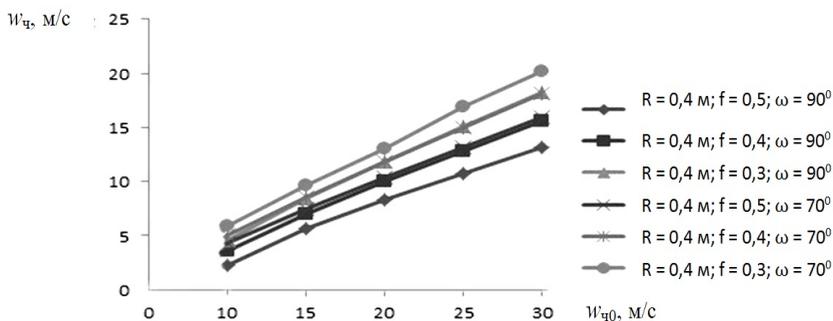


Рис. 2.5. График зависимости изменения скорости семян зерновых и зернобобовых культур за отводом от скорости семян перед отводом в предполагаемом ($\omega = 70^\circ$) и в базовом распределителях ($\omega = 90^\circ$) при различных коэффициентах трения

Анализ графических зависимостей показал, что в предполагаемом распределителе скорость посевного материала теряется не более чем на 40 %, что меньше, чем при резком повороте потока в базовом распределителе.

Исследовав характер распределения полей скоростей воздушного потока в отводе, траекторию движения отдельной частицы и действующие на нее силы, а также определив величину скорости частицы на выходе из отвода, можно сделать вывод, что при движении в отводе на частицу действуют сила трения, реакция опоры, сила тяжести и аэродинамическая сила, величина которой зависит от массы частицы, скорости, которую она имела при входе в отвод, и его радиуса. Вследствие этого частицы посевного материала в отводе распределяются по его наружной стенке, снижая свою скорость, что подтверждается полями скоростей (см. рис. 2.5). На основании вышеизложенного приходим к выводу о целесообразности выравнивания скорости материаловоздушной смеси по поперечному сечению вертикальной колонны. Наиболее простой способ – увеличение турбулентности потока.

2.3. Обоснование формы и конструктивных параметров вертикальной турбулизирующей вставки

Одним из наиболее распространенных на практике способов снижения неравномерности распределения является дополнительная турбулизация поступающей к распределительной головке материаловоздушной смеси, которая осуществляется посредством различных по конструкции элементов, устанавливаемых на вертикальном участке подводящего трубопровода. Это способствует выравниванию концентрации частиц высеваемого материала по поперечному сечению трубопровода.

В связи с этим предлагается конструкция комбинированного вертикального распределителя в виде турбулизирующей вставки и направлятеля, установленного в крышке распределительной головки (рис. 2.6).

Турбулизирующая вставка выполнена из конфузора и диффузора в виде соосно установленных двух усеченных конусов, соединенных верхними основаниями, причем конфузор расположен во впускной части вставки (рис. 2.7). Такая конструкция вставки обеспечивает равномерное распределение транспортируемого материала по поперечному сечению вертикальной колонны [113].

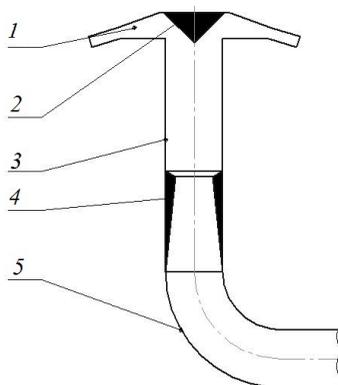


Рис. 2.6. Конструкция комбинированного вертикального распределителя:
 1 – распределительная головка; 2 – направлятель; 3 – вертикальная колонна;
 4 – турбулизирующая вставка; 5 – отвод

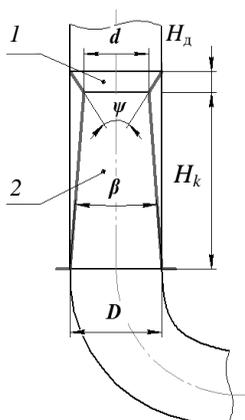


Рис. 2.7. Схема турбулизирующей вставки:
 1 – диффузорная часть; 2 – конфузорная часть;
 d – выходной диаметр конфузора; D – входной диаметр конфузора;
 β – угол сужения конфузора; ψ – угол расширения диффузора;
 H_k – высота конфузора; H_d – высота диффузора

Турбулизирующая вставка состоит из конфузорной и диффузорной частей, поэтому необходимо рассмотреть протекающие в них процессы более подробно, чтобы выявить возможности получения требуемых функциональных свойств.

Конфузор предназначен для преобразования статического давления в динамическое, создания однородного поля скоростей

и давлений, а также для увеличения турбулентности воздушного потока на выходе из него. Он представляет собой канал с плавно уменьшающимся под определенным углом в направлении потока поперечным сечением до определенного размера.

Необходимым требованием к конфузoram, предназначенным для аэродинамических систем, является совпадение направления скоростей потока на входе и выходе с направлением оси конфузора [111].

Основным фактором, от которого зависит работа конфузора, является величина степени поджатия:

$$n = \frac{F_1}{F_2}, \quad (2.25)$$

где F_1 – площадь входного сечения конфузора, м^2 ; F_2 – площадь выходного сечения конфузора, м^2 .

Однако в данном случае не учитывается наличие в воздушном потоке посевного материала. С учетом этого, а также считая, что посевной материал равномерно распределяется по сечению распределителя, имеем уточненную степень поджатия для двухкомпонентного потока:

$$n_y = \frac{F_1 - F_3}{F_2 - F_3}, \quad (2.26)$$

где F_3 – площадь, занимаемая зерном в ограниченном слое, м^2 .

При одинаковой степени поджатия, но разной длине конфузора, зависящей от угла сужения β , большие потери будут у короткого конфузора. Эти потери для конического конфузора оцениваются коэффициентом сопротивления.

Графическая зависимость сопротивления конфузора от угла сужения установлена немецким исследователем О. Баком (рис. 2.8) [114].

Анализ графика показал, что данная зависимость носит нелинейный характер. До 20° происходит плавное снижение коэффициента сопротивления конфузора, после чего он начинает увеличиваться. Таким образом, рациональный угол сужения конфузора находится в диапазоне от 8 до 20° .

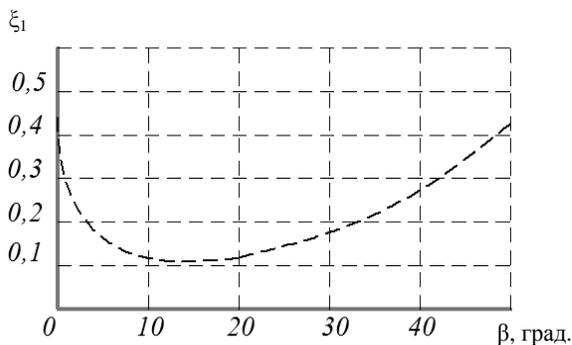


Рис. 2.8. График зависимости сопротивления конфузора от угла сужения

Определим основные конструктивные параметры турбулизирующей вставки (см. рис. 2.7). Входной диаметр D конфузора турбулизирующей вставки составляет 0,14 м.

Из формулы (2.26) выразим, чему будет равен выходной диаметр d конусной части турбулизирующей вставки, учитывая, что турбулентность на выходе из конфузора больше, чем на входе, при степени поджатия менее четырех [111]. Имеем:

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi D^2 + 12F_3}{\pi}}. \quad (2.27)$$

Анализ выражения позволил определить, что рациональный выходной диаметр конфузора турбулизирующей вставки находится в диапазоне от 80 до 100 мм.

Отсюда высота конфузора турбулизирующей вставки

$$H_k = \frac{D - d}{2 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}. \quad (2.28)$$

Таким образом, высота конфузора находится в пределах от 110 до 429 мм.

В работах И. Е. Идельчика [115], М. Е. Дейча [87], А. Ш. Дорфмана [116], И. Л. Повха [111] отмечается, что наибольшие потери давления в аэродинамических системах вызывает диффузор, в котором течения довольно сложные с точки зрения аэродинамики,

и здесь происходят значительные потери давления транспортирующей среды. Диффузор представляет собой расширяющийся канал, в котором поток в различных зонах его поперечного сечения имеет специфический характер течения.

Наибольшее сопротивление оказывает вихреобразование, которое происходит вследствие того, что градиент давления в расширяющихся каналах положителен, а градиент скорости отрицателен, значит, движение осуществляется против нарастающего давления. Поэтому потоки вблизи стенки под действием градиента давления начинают двигаться в направлении, противоположном направлению течения в ядре потока. Причем интенсивность отрыва потока от стенок зависит от угла расширения.

Известно, что при больших углах расширения диффузора (90°) выравнивание потока происходит значительно быстрее. Об этом свидетельствуют фотографии потока за диффузором. В разработанном устройстве работа диффузора была улучшена турбулизацией потока в конфузоре, поэтому чем больше поток содержит вихрей, тем труднее происходит их отрыв от стенок диффузора. По исследованиям Г. Н. Абрамовича [82], смещение, при котором происходит стабилизация потока, требует участка, имеющего относительную длину, равную 4 диаметрам вертикальной колонны. Такая длина соответствует также данным испытаний, приведенным Г. Н. Абрамовичем.

Исходя из вышесказанного, угол расширения ψ диффузора турбулизирующей вставки был принят 90° , следовательно, высота диффузора

$$H_d = \frac{D-d}{2 \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}}. \quad (2.29)$$

Соответственно, высота диффузора должна составлять от 20 до 30 мм.

Таким образом, установка в вертикальной колонне распределительного устройства турбулизирующей вставки, имеющей конфузорно-диффузорную форму, способствовала увеличению турбулентности материало-воздушной смеси. Это вызывает интенсивное перемешивание и равномерное распределение посевного материала по поперечному сечению вертикальной колонны при входе в распределительную головку.

2.4. Анализ движения посевного материала в горизонтальной турбулизирующей вставке

Принятая схема системы высева по своему виду является пневмомеханической группового дозирования посевного материала (рис. 2.9).

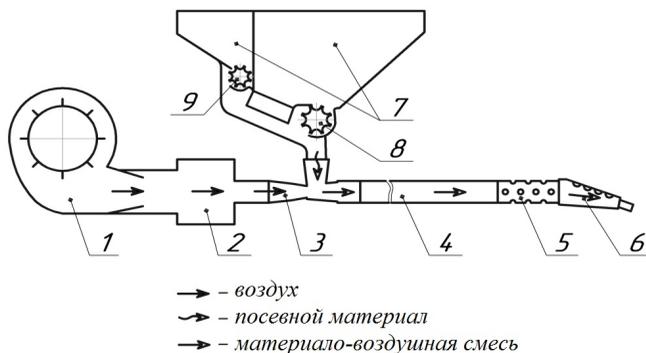


Рис. 2.9. Принципиальная схема пневмомеханической системы высева с горизонтальным распределителем:

1 – вентилятор; 2 – ресивер; 3 – питатель эжекторного типа;
4 – материалопровод; 5 – выравнивающее устройство; 6 – распределитель потока посевного материала; 7 – бункер; 8 – дозатор семян; 9 – дозатор удобрений

Пневматическая часть системы включает все элементы, кроме дозаторов семян и удобрений и бункера. Закономерности процессов истечения посевного материала из бункера и дозирование его катушечными дозаторами достаточно полно установлены многочисленными исследованиями [71, 117–119]. Поэтому в данной работе они не рассматриваются.

Источником воздушного потока для транспортирования посевного материала в принятой схеме является вентилятор центробежного типа высокого давления. Параметры воздушного потока наряду с требуемой нормой высева являются исходными данными для расчета остальных элементов системы высева на основании законов аэродинамики. Энергия воздушного потока затрачивается на перемещение материала и преодоление местных сопротивлений, вызывающих потери его давления. Общие потери давления в системе представляют собой сумму потерь давления в отдельных элементах системы [120]:

$$\Delta P = \Delta P_{\Pi} + \Delta P_{\text{М}} + \Delta P_{\text{В}} + \Delta P_{\text{Р}}, \quad (2.30)$$

где ΔP_{Π} – потери давления в питателе, Па; $\Delta P_{\text{М}}$ – потери давления в материалопроводе, Па; $\Delta P_{\text{В}}$ – потери давления в выравнивателе, Па; $\Delta P_{\text{Р}}$ – потери давления в распределителе потока материала, Па.

Поэтому необходимо выявить общие закономерности процесса течения в каждом элементе для минимизации этих потерь. В качестве устройства, подающего посевной материал в транспортную сеть, находящуюся под избыточным давлением, выбран питатель эжекторного типа, состоящий из сооснорасположенных конфузора и диффузора. Расчет питателя такого типа сводится к определению основных геометрических параметров проточной части, обеспечивающих при заданных начальных параметрах воздушного потока транспортирование требуемого объема посевного материала со скоростью, необходимой для равномерного распределения по сошникам. Принцип действия питателя эжекторного типа основан на преобразовании статического давления в динамическое, позволяющее создавать в месте ввода материала в воздушный поток статическое давление, равное атмосферному или несколько ниже его, и преобразовании динамического давления в статическое – для транспортирования материала [121]. Принципиальная схема питателя эжекторного типа представлена на рис. 2.10.

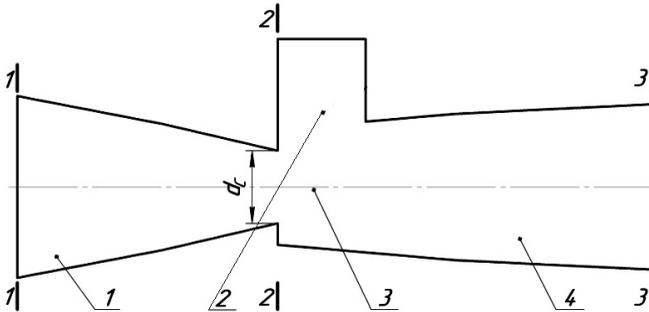


Рис. 2.10. Схема питателя эжекторного типа:

1 – конфузор; 2 – загрузочная горловина; 3 – приемная камера; 4 – диффузор

Пропускная способность (производительность) питателя эжекторного типа зависит от расхода и скорости воздушного потока

в его приемной камере. По заданной производительности питателя по материалу Q_M , соответствующей максимальной норме высева, и допустимой концентрации смеси μ , позволяющей транспортирование с необходимой скоростью, требуемый расход воздуха Q_B определяется по формуле [107]:

$$Q_B = \frac{Q_M}{\mu \rho_B}, \quad (2.31)$$

где Q_M – подача материала, кг/с.

С учетом диаметра выходного сечения конфузора d_c необходимый расход воздуха

$$Q_B = \frac{\pi d_c^2 w_{B2}}{4}, \quad (2.32)$$

где d_c – диаметр выходного сечения конфузора, м; w_{B2} – скорость воздушного потока в выходном сечении конфузора, м/с.

Известно [122], что расход воздуха в конфузоре зависит от разности давлений на его входе и выходе. На основании теории газодинамических процессов в сужающихся каналах, расход воздуха через конфузор можно определить из выражения [123]:

$$Q_B = \frac{F_2}{V_{m2}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_1 V_{m1} \left[1 - \chi^{\left(\frac{k-1}{k}\right)} \right]}, \quad (2.33)$$

где F_2 – площадь выходного отверстия конфузора, м²; V_{m1} и V_{m2} – удельный объем газа на входе и выходе канала, м³/кг; P_1 – давление на входе, Па; k – показатель адиабаты (для воздуха $k = 1,4$); $c = \frac{P_2}{P_1}$ – коэффициент перепада давлений на входе и выходе канала (P_2 – давление на выходе из канала, Па).

Приравняв выражения (2.31) и (2.33), определяем пропускную способность питателя [124]:

$$Q_M = \frac{\mu \rho_B F_2}{V_{m2}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{V_{m1}^{-1}} \left[\chi^{\frac{2}{k}} - \chi^{\left(\frac{k+1}{k}\right)} \right]}. \quad (2.34)$$

Тогда максимальная концентрация смеси

$$\mu = \frac{Q_M}{\frac{\rho_B F_2}{V_{m2}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{V_{m1}^{-1}} \left[\chi^{\frac{2}{k}} - \chi^{\left(\frac{k+1}{k}\right)} \right]}}. \quad (2.35)$$

Необходимая скорость воздушного потока в выходном сечении конфузора связана с концентрацией выражением

$$\frac{Q_M}{\mu \rho_B} = F_2 w_{B2}, \quad (2.36)$$

из которого следует, что

$$\mu = \frac{Q_M}{F_2 w_{B2} \rho_B}. \quad (2.37)$$

Приравняв выражения (2.35) и (2.37) после преобразования, находим формулу для определения скорости воздушного потока на выходе конфузора:

$$w_{B2} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{V_{m1}^{-1}} \left[\chi^{\frac{2}{k}} - \chi^{\left(\frac{k+1}{k}\right)} \right]}. \quad (2.38)$$

Выражения (2.34) и (2.38) служат основой для расчета питателей эжекторного типа. Общие потери давления в питателе складываются из внутренних потерь и потерь на разгон материала до скорости транспортирования на выходе из диффузора [125]:

$$\Delta P_{\Pi} = \Delta P_{\text{вн}} + \Delta P_{\text{рм}}, \quad (2.39)$$

где $\Delta P_{\text{вн}}$ – внутренние потери в питателе при прохождении через него воздуха, Па; $\Delta P_{\text{рм}}$ – потери на разгон материала до скорости транспортирования, Па.

Внутренние потери в питателе складываются из потерь в конфузоре, диффузоре и загрузочной горловине:

$$\Delta P_{\text{вн}} = \Delta P_{\text{к}} + \Delta P_{\text{д}} + \Delta P_{\text{у}}, \quad (2.40)$$

где $\Delta P_{\text{к}}$, $\Delta P_{\text{д}}$ – соответственно, потери давления в конфузоре и диффузоре, Па; $\Delta P_{\text{у}}$ – потери давления, связанные с утечками воздуха через загрузочную горловину эжектора, Па.

Течение воздушного потока в питателе (см. рис. 2.10) подчиняется уравнению Бернулли, которое без учета потерь имеет вид [126, 127]:

$$P_1 + \frac{\rho_{\text{в}} w_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho_{\text{в}} w_2^2}{2} = P_3 + \frac{\rho_{\text{в}} w_3^2}{2}, \quad (2.41)$$

где w_1 , w_2 и w_3 – скорость воздушного потока в сечениях 1–1, 2–2 и 3–3 соответственно, м/с; P_1 , P_2 и P_3 – статическое давление в сечениях 1–1, 2–2 и 3–3 соответственно, Па.

Для надежной работы питателя необходимо, чтобы статическое давление в месте ввода материала в питатель (приемной камере) было равно атмосферному ($P_2 = 0$) или несколько ниже его (разрежение). При этом условии выражение (2.41) примет следующий вид:

$$P_1 + \frac{\rho_{\text{в}} w_1^2}{2} = \frac{\rho_{\text{в}} w_2^2}{2} = P_3 + \frac{\rho_{\text{в}} w_3^2}{2}. \quad (2.42)$$

Из равенства (2.42) следует, что в сечении 2–2 концентрируется полная энергия воздушного потока, которая может быть выражена через динамическое давление. Это обстоятельство очень важно при расчете питателя. Для предотвращения выброса воздуха через загрузочную горловину необходимо равенство динамического давления в приемной камере и полного сопротивления системы. Если сопротивление последней будет больше динамического давления, то происходит выбрасывание подаваемого материала через загрузочную горловину. Преобладание динамического давления обеспечивает условия, необходимые для ввода материала, так как возникает подсос воздуха через загрузочную горловину [128], т. е. должно выполняться неравенство

$$\frac{\rho_B w_2^2}{2} \geq \Delta P_{2-3} + \Delta P, \quad (2.43)$$

где ΔP_{2-3} – потери давления на участке между сечениями 2–2 и 3–3, Па; ΔP – потери давления в системе, Па.

Следующим важным аспектом является то, что статическое давление P_3 затрачивается на преодоление сопротивления в системе при перемещении материала [121]. Следовательно, для обеспечения транспортирования должно соблюдаться второе неравенство:

$$P_3 \geq \Delta P. \quad (2.44)$$

Так как в питателях эжекторного типа имеют место потери давления, которые необходимо учитывать при проектировании, то уравнение Бернулли принимает следующий вид:

$$P_1 + \frac{\rho_B w_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho_B w_2^2}{2} - \Delta P_K = P_3 + \frac{\rho_B w_3^2}{2} - \Delta P_D. \quad (2.45)$$

Потери в конфузоре складываются из потерь воздушного потока на трение в канале и определяются через коэффициент сопротивления ξ_1 , величина которого зависит от степени поджатия конфузора и его длины [111].

Потери в диффузоре складываются из потерь на трение воздуха о стенки канала и на расширение потока. Кроме этого в диффузоре происходит разгон материала до скорости транспортирования, и часть энергии воздушного потока затрачивается на трение частиц материала о стенки канала.

Потери ΔP_K и ΔP_D зависят не только от начальных параметров воздушного потока в сечениях 1–1, 2–2 и 3–3, но также от геометрических параметров и формы их проточной части.

Рассмотрим процесс работы эжекторного питателя более подробно.

Перепад давлений вдоль оси симметрии между сечениями 1–1 и 2–2 описывается следующим выражением [82]:

$$\Delta P_{1-2} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} \rho_B + \xi_1 \frac{w_2^2}{2} \rho_B, \quad (2.46)$$

где ξ_1 – коэффициент аэродинамического сопротивления конфузора.

Перепад давлений между сечениями 2–2 и 3–3 складывается из перепада давлений, вызываемого течением транспортирующего воздуха через диффузор, и перепада давления, вызванного движением транспортируемого материала:

$$\Delta P_{2-3} = \frac{w_3^2 - w_2^2}{2} \rho_B + \xi_2 \frac{w_2^2}{2} \rho_B, \quad (2.47)$$

где ξ_2 – коэффициент аэродинамического сопротивления диффузора.

Перепад давлений, вызванный движением материала, приближенно определяется по выражению

$$\Delta P_{M2-3} = \mu \frac{w_2^2}{2} \rho_B \frac{2w_{M3}}{w_2}, \quad (2.48)$$

где w_{M3} – скорость транспортируемого материала в сечении 3–3, м/с.

Таким образом, суммарный перепад давления на участке между сечениями 2–2 и 3–3 составит

$$\Delta P_{2-3\text{сум}} = \Delta P_{2-3} + \Delta P_{M2-3}. \quad (2.49)$$

Поскольку в месте ввода материала P_2 должно быть равно нулю, то давление P_3 определяется зависимостью

$$P_3 = -\Delta P_{2-3} - \Delta P_{M2-3}. \quad (2.50)$$

После преобразования

$$P_3 = \frac{w_2^2 - w_3^2}{2} \rho_B - \xi_2 \frac{w_2^2}{2} \rho_B - \Delta P_{M2-3}. \quad (2.51)$$

Тогда суммарное давление в сечении 3–3 на основании уравнений (2.48) и (2.51) определяется выражением

$$P_{C3} = \frac{w_2^2}{2} \rho_B (1 - \xi_2) - \Delta P_{M2-3}. \quad (2.52)$$

На основании аналогичного рассуждения получим окончательное выражение суммарного давления на входе в питатель:

$$P_{C1} = P_1 + \frac{w_1^2}{2} \rho_B = \frac{w_2^2}{2} \rho_B \left(1 + \xi_1 \frac{F_2^2}{F_1^2} \right). \quad (2.53)$$

В результате проведения теоретического анализа закономерностей течения воздушного потока в питателе эжекторного типа установлено, что его пропускная способность во многом зависит от аэродинамического сопротивления конфузора и диффузора. Поэтому необходимо рассмотреть протекающие в них процессы более подробно и выявить возможности для получения требуемых функциональных свойств.

Конфузор предназначен для преобразования статического давления в динамическое, создания однородного поля скоростей и давлений, а также для увеличения скорости воздушного потока на выходе из него. От этих факторов зависит стабильность ввода транспортируемого материала в воздушный поток и дальнейшее его перемещение.

Он представляет собой канал с плавно уменьшающимся под определенным углом в направлении потока поперечным сечением до определенного размера. Форма этого сечения может быть разнообразной: круглой, квадратной, эллиптической (и т. д.), одинаковой или различной на входе и выходе.

Необходимым требованием к конфузoram, предназначенным для аэродинамических систем, является совпадение направления скоростей потока на входе и выходе, с направлением оси конфузора, т. е. отсутствуют завихрения и турбулентные образования [111].

В действительности течение в конфузоре сопровождается потерями вследствие неравномерности распределения параметров воздушного потока по сечению, несоосностью вектора скорости с осью выходного сечения, трения его о стенки и теплообмен с ними. Все это создает сопротивление, увеличивает потери давления, следовательно, снижает пропускную способность питателя в целом. Факторами, от которых зависит работа конфузора, являются степень поджатия, угол сужения и форма обвода (форма кривой, образующей канал). Поэтому проектирование конфузора заключается в аэродинамическом расчете и профилировании обвода. Основной характеристикой является величина степени поджатия [111]:

$$n = \frac{F_1}{F_2}. \quad (2.54)$$

Значение n находится в пределах от 3 до 10. Однако при равенстве значений n , но разной длине, зависящей от угла сужения β , большие потери будут у короткого. Эти потери для конического конфузора оцениваются коэффициентом сопротивления, определяемым по формуле, предложенной Г. Эйфелем [58]:

$$\xi_1 = \frac{\lambda}{\sin \frac{\beta}{2}} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2} \right). \quad (2.55)$$

Очевидно, что меньшим значениям угла при одинаковой степени поджатия соответствует большая длина конфузора. Это вызывает увеличение габаритных размеров всего питателя, с которыми применение его в пневматической системе высева затруднительно по причине плотной компоновки посевной машины. В этой связи необходимо было конструктивно усовершенствовать конфузор, но сохранить в нем классический характер течения воздушного потока. Решение этой задачи возможно, если определить оптимальную форму обвода. В работе Н. Е. Жуковского [129] отмечается, что необходимо придавать «форму поверхностей тока такого незавихренного течения, при котором на близком расстоянии от конца трубы траектории частиц делаются почти прямолинейными». По формуле Витошинского [111, с. 139], И. Л. Повх предложил уравнение кривой обвода конфузора в следующем виде:

$$r = \frac{r_1}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right] \frac{\left(1 - \frac{3z^2}{a^2} \right)}{\left(1 + \frac{3z^2}{a^2} \right)^2}}}, \quad (2.56)$$

где r – текущий радиус конфузора на расстоянии a от начала координат, м; r_1 и r_2 – радиусы входного и выходного сечений, м; z – текущая длина конфузора, м.

Форма обвода в соответствии с выражением (2.56) представлена на рис. 2.11, на котором отображены сложная форма обвода и угол сужения, имеющий переменные значения: большее – у входного сечения и меньшее – у выходного.

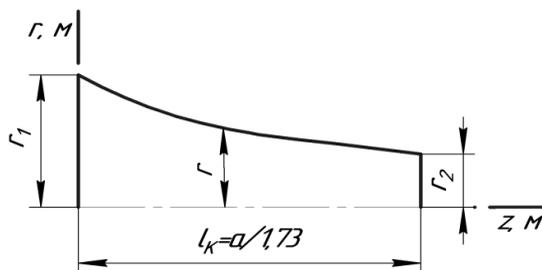


Рис. 2.11. Форма обвода конфузора

Изготовление конфузора с такими формами обвода технически затруднительно. Поэтому, с учетом зависимости (2.56), исследована возможность получения двухступенчатой формы обвода с фиксированными углами сужения на участках определенной длины, обеспечивающей функциональные свойства, максимально приближенные к классическим (рис. 2.12).

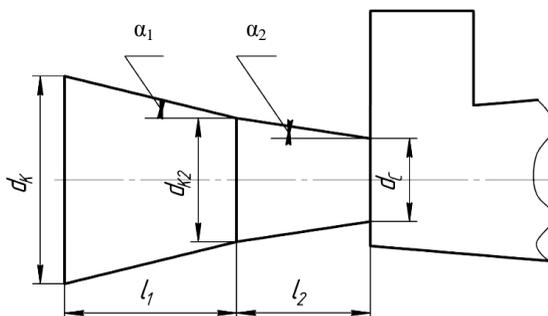


Рис. 2.12. Схема ступенчатого конфузора:

l_1 – длина первой ступени конфузора, м; l_2 – длина второй ступени конфузора, м;
 α_1 – угол сужения первой ступени конфузора, град.; α_2 – угол сужения второй ступени конфузора, град.; d_k – диаметр входного сечения первой ступени конфузора, м; d_c – диаметр выходного сечения второй ступени конфузора, м;
 d_{k2} – диаметр входного сечения второй ступени конфузора, м

В этом случае общий коэффициент сопротивления конфузора принимает вид:

$$\xi_1 = \xi_{1K} + \xi_{2K}, \quad (2.57)$$

где ξ_{1K} – коэффициент сопротивления первой ступени конфузора; ξ_{2K} – коэффициент сопротивления второй ступени конфузора.

Согласно рекомендациям [130], угол α_2 принимаем равным 9° . Значения α_1 , l_1 и l_2 при заданных значениях d_1 и d_2 определяются экспериментальным путем [131]. В работах М. Е. Дейча [87], И. Е. Идельчика [115], А. Ш. Дорфмана [116], И. Л. Повха [132] отмечается, что наибольшие потери давления в аэродинамических системах вызывает диффузор, в котором течения довольно сложные с точки зрения аэродинамики, и здесь происходят значительные потери давления транспортирующей среды. Эти потери зависят от сопротивления диффузора, оцениваемого коэффициентом потерь, используемым при расчете питателя.

Поэтому важно рассмотреть характер течения созданного в нем потока и определить факторы, оперируя которыми можно улучшить его функциональные свойства. Диффузор представляет собой расширяющийся канал, в котором поток в различных зонах его поперечного сечения имеет специфический характер течения (рис. 2.13) [115]. На рис. 2.13 видны зоны ламинарного течения (ядро), турбулентного и вихревого образований, «мертвая зона». Все они вызывают сопротивление. Но наибольшее сопротивление оказывает вихреобразование. Это происходит вследствие того, что градиент давления в расширяющихся каналах положителен, а градиент скорости отрицателен, т. е. движение осуществляется против нарастающего давления. Поэтому потоки вблизи стенки под действием градиента давления начинают двигаться в направлении, противоположном направлению течения в ядре потока. При этом интенсивность отрыва потока от стенок зависит от угла расширения.

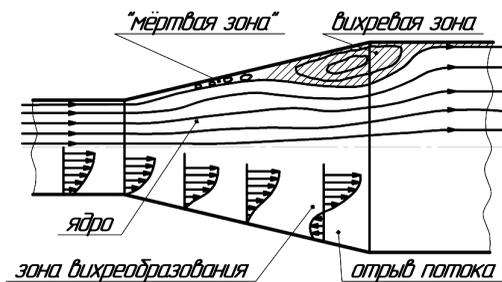


Рис. 2.13. Характер течения потока в диффузоре

Исследованиями [115–132] установлено, что при достаточно малых углах расширения на некотором удалении от входа наблюдается

безотрывное течение. Причем длина этого участка при выполнении требований по степени расширения может достигать значительной величины. Поэтому в пневматической системе высева применение в питателях диффузоров с малыми углами расширения затруднительно по конструктивным причинам. В этом случае целесообразно применение диффузора, сочетающего в себе плавное расширение с последующим внезапным расширением (ступенчатый диффузор) (рис. 2.14).

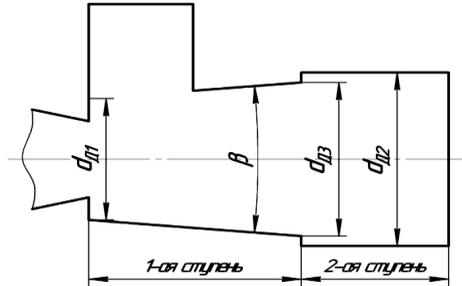


Рис. 2.14. Схема ступенчатого диффузора:
 $d_{д1}$ – диаметр входного сечения диффузора; $d_{д3}$ – диаметр выходного сечения расширяющейся части диффузора; $d_{д2}$ – диаметр выходного сечения диффузора; β – угол расширения диффузора

Здесь суммарные потери давления $\Delta P_{д}$ состоят из потерь на преодоление трения $\Delta P_{тр}$ и потерь при расширении $\Delta P_{РА}$:

$$\Delta P_{д} = \Delta P_{тр} + \Delta P_{РА}. \quad (2.58)$$

Тогда суммарный коэффициент потерь в диффузоре ξ_1 можно записать как сумму коэффициентов [133]:

$$\xi_2 = \xi_{тр} + \xi_{РА}, \quad (2.59)$$

где $\xi_{тр}$ – коэффициент аэродинамических потерь на трение; $\xi_{РА}$ – коэффициент аэродинамических потерь на расширение.

Для определения этих коэффициентов проведем аналитический расчет. Работа сил трения за 1 с [111]

$$\Delta E_{тр} = R w_i, \quad (2.60)$$

где R – сила трения, Н; w_i – скорость воздушного потока в указанной точке, м/с.

Сила трения

$$R = \int_{\sigma} \frac{\lambda}{4} \frac{\rho_B w_i^2}{2} d\sigma, \quad (2.61)$$

где σ – площадь стенок диффузора, м^2 .

Тогда работа сил трения

$$\Delta E_{\text{ТР}} = \int_{\sigma} \frac{\lambda}{4} \frac{\rho_B w_i^3}{2} d\sigma. \quad (2.62)$$

Коэффициент потерь давления на трение в диффузоре определяется как отношение энергии, потерянной на трение $\Delta E_{\text{ТР}}$, к динамическому давлению на входе в диффузор $\frac{m w_{\text{Д1}}^2}{2}$:

$$\xi_{\text{ТР}} = \frac{\Delta E_{\text{ТР}}}{\frac{m w_{\text{Д1}}^2}{2}} = \frac{1}{F_3} \int_{\sigma} \frac{\lambda}{4} \left(\frac{w_i}{w_{\text{Д1}}} \right)^3 d\sigma, \quad (2.63)$$

где $m = \rho_B F_3 w_{\text{Д1}}^2$ – секундная масса, кг/с ; F_3 – площадь, занимаемая зерном в ограниченном слое, м^2 ; $w_{\text{Д1}}$ – скорость во входном сечении диффузора, м/с .

Из условия неразрывности потока следует, что $w_i = \frac{F_3 w_{\text{Д1}}}{F}$.

Тогда коэффициент потерь на трение для диффузора любой формы поперечного сечения

$$\xi_{\text{ТР}} = F_3^2 \frac{\lambda}{4} \int_{\sigma} \left(\frac{d\sigma}{F^3} \right), \quad (2.64)$$

где F – переменная площадь сечения диффузора, м^2 .

Для диффузора круглого поперечного сечения $dF = \sin \frac{\beta}{2} d\sigma$.

Тогда

$$\xi_{\text{ТР}} = \frac{F_3^2 \lambda}{4 \sin \frac{\beta}{2}} \int \left(\frac{d\sigma}{F^3} \right). \quad (2.65)$$

Проинтегрировав, окончательно получим:

$$\xi_{\text{ТР}} = \frac{F_3^2 \lambda}{8 \sin \frac{\beta}{2}} \left[\frac{1}{F_3^2} - \frac{1}{F_4^2} \right] = \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\beta}{2}} \left[1 - \left(\frac{F_3}{F_4} \right)^2 \right], \quad (2.66)$$

где F_4 – площадь выходного сечения первой ступени, м².

Обозначим $\frac{F_4}{F_3}$ через f – степень расширения первой ступени.

Тогда выражение (2.66) принимает вид:

$$\xi_{\text{ТР}} = \frac{F_3^2 \lambda}{8 \sin \frac{\beta}{2}} \left[\frac{1}{F_3^2} - \frac{1}{F_4^2} \right] = \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\beta}{2}} \frac{f^2 - 1}{f^2}. \quad (2.67)$$

Коэффициент потерь от расширения можно определить по теории Гибсона [133], по которой для углов расширения диффузора $\beta = 0^\circ \dots 40^\circ$ он практически не зависит от степени расширения диффузора и описывается выражением

$$\xi_{\text{РА}} = 3,2 \left(\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \right)^{1,25}. \quad (2.68)$$

Общий коэффициент потерь в ступенчатом диффузоре ξ_2 будет равен сумме коэффициентов потерь на плавно расширяющемся участке $\xi_{\text{П}}$ и при внезапном расширении $\xi_{\text{УД}}$:

$$\xi_2 = \xi_{\text{П}} + \xi_{\text{УД}}, \quad (2.69)$$

или

$$\xi_2 = \xi_{\text{ТР}} + \xi_{\text{РА}} + \xi_{\text{УД}}, \quad (2.70)$$

где $\xi_{\text{УД}}$ определяется по формуле

$$\xi_{\text{вд}} = \left(1 - \frac{w_{\text{д2}}}{w_{\text{д1}}}\right)^2 \left(\frac{w_{\text{д3}}}{w_{\text{д1}}}\right)^2 = \left(1 - \frac{1}{f_1}\right)^2 \frac{1}{f^2}, \quad (2.71)$$

где $w_{\text{д2}}$ – скорость воздушного потока в выходном сечении второй ступени диффузора, м/с; $w_{\text{д3}}$ – скорость воздушного потока в выходном сечении первой ступени, м/с; $f_1 = \frac{F_5}{F_4}$ – степень расширения второй ступени, где F_5 – площадь выходного сечения второй ступени, м².

Тогда ξ_2 на основании выражений (2.67), (2.68) и (2.71) запишется в виде

$$\xi_2 = \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\beta}{2}} \frac{f^2 - 1}{f^2} + 3, 2 \left(\text{tg} \frac{\beta}{2}\right)^{1,25} + \left(1 - \frac{1}{f_1}\right)^2 \frac{1}{f^2}. \quad (2.72)$$

Из анализа выражения (2.72) следует, что потери давления в ступенчатом диффузоре меньше по сравнению с обычным (коническим) при одинаковых углах расширения, но при меньшей его длине [125, 134, 135].

Проведенные теоретические исследования позволяют обосновать конструктивную схему питателя эжекторного типа, представляющего собой конфузор с переменными углами сужения, ступенчатый диффузор и приемную камеру, расположенную на диффузоре [136]. Такая схема питателя позволяет на 15 %...20 % уменьшить его аэродинамическое сопротивление и снизить потери давления, что способствует увеличению производительности и стабильному транспортированию посевного материала без расслоения [137].

2.5. Процесс движения частицы посевного материала в вертикальной колонне распределительного устройства пневматической системы высева

Посевной материал, транспортируемый воздушным потоком к распределительной головке, проходит отвод, где под действием инерционных сил концентрируется у поверхности с большим радиусом кривизны. Далее посевной материал поступает в вертикальную колонну, где установлена турбулизирующая вставка. На каждом из этих участков характер течения потока материало-

воздушной смеси различным, определяемый в основном конструктивными особенностями элементов устройства и аэродинамическими параметрами транспортируемого материала. Рассмотрим изменение скорости движения частиц посевного материала при выходе из турбулизирующей вставки (рис. 2.15).

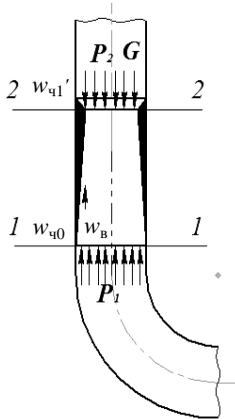


Рис. 2.15. Изменение скорости частиц при ее движении в турбулизирующей вставке в соответствующих сечениях на входе и выходе в конфузоре

Используя теорему об изменении количества движения, составим уравнение для данной системы:

$$m_c (w_{ч1} - w_{ч}) = P_1 - P_2 - G, \quad (2.73)$$

где m_c – секундный расход воздуха, кг/с; $w_{ч1}$ – скорость частиц на выходе из вставки (сечение 2–2), м/с; P_1 – давление воздушного потока на входе в турбулизирующую вставку (сечение 1–1), Па; P_2 – давление воздушного потока на выходе из турбулизирующей вставки (сечение 2–2), Па.

Учитывая, что

$$m_c = \rho_B S w_B, \quad (2.74)$$

где S – площадь поперечного сечения трубопровода, m^2 , составим уравнение

$$\rho_B S w_B (w_{ч1} - w_{ч}) = P_1 - P_2 - G, \quad (2.75)$$

из которого выразим скорость частиц на выходе из турбулизирующей вставки:

$$w_{\text{ч1}} = \frac{P_1 - P_2 - G + \rho_{\text{в}} S w_{\text{ч}}}{\rho_{\text{в}} S w_{\text{ч}}} . \quad (2.76)$$

Вертикальная колонна состоит из участка с турбулизирующей вставкой и вертикального подводящего участка перед входом в распределительную головку.

Рассмотрим движение частицы в подводящем участке. При движении в восходящем воздушном потоке на нее оказывает действие аэродинамическая сила $P_{\text{в}}$ и сила тяжести G (рис. 2.16).

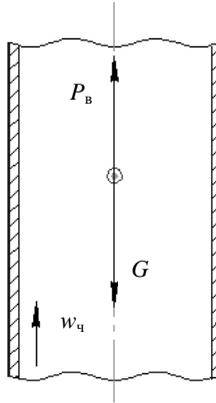


Рис. 2.16. Схема сил, действующих на частицу в восходящем воздушном потоке

Составим уравнение движения частицы в восходящем воздушном потоке:

$$m \frac{dw_{\text{ч}}}{dt} = P_{\text{в}} - G . \quad (2.77)$$

Величина аэродинамической силы при развитом турбулентном движении можно определить по формуле (2.16).

Сила тяжести

$$G = mg . \quad (2.78)$$

Подставим значения сил P_B и G в уравнение (2.77):

$$m \frac{dw_{ч}}{dt} = k_{\pi} m (w_B - w_{ч2})^2 - mg, \quad (2.79)$$

где $w_{ч2}$ – скорость витания частицы в восходящем воздушном потоке, м/с.

После проведения преобразований в уравнении (2.79) определится

$$\frac{dw_{ч}}{dt} = k_{\pi} \left[(w_B - w_{ч2})^2 - \frac{g}{k_{\pi}} \right]. \quad (2.80)$$

Обозначим переменные $l^2 = \frac{g}{k_{\pi}}$ и $a = (w_B - w_{ч2})$, и уравнение (2.80)

примет вид

$$\frac{dw_{ч}}{dt} = k_{\pi} (a^2 - l^2). \quad (2.81)$$

Приведем уравнение (2.81) к новой переменной – ординате y .

Получим следующее уравнение:

$$\frac{w_{ч} dw_{ч}}{dy} = k_{\pi} (a^2 - l^2). \quad (2.82)$$

Разделим уравнение (2.82) почленно для переноса dy в правую часть уравнения:

$$\frac{w_{ч} dw_{ч}}{(a^2 - l^2)} = k_{\pi} dy. \quad (2.83)$$

Решая уравнение (2.83) по способу Бернулли, делаем замену переменной $U = w_{ч2}$, $dU = 2w_{ч}dw_{ч}$ и интегрируем:

$$\int \frac{dU}{(a^2 - l^2)} = 2k_{\pi} \int dy. \quad (2.84)$$

Интегрируем уравнение (2.84):

$$-\frac{1}{2l} \ln \frac{l+a}{l-a} = 2k_n y + C_1. \quad (2.85)$$

Из начальных условий имеем:

$$(a = w_{q0}; y = 0) \rightarrow C_1 = -\frac{1}{2l} \ln \frac{l+w_{q0}}{l-w_{q0}},$$

где w_{q0} – скорость на выходе из турбулизирующей вставки ($w_{q0} = w_{q1}$), м/с.

Подставляем значение C_1 в уравнение (2.85) и после преобразований получаем:

$$-\frac{1}{2l} \left(\ln \frac{l+a}{l-a} - \ln \frac{l+w_{q0}}{l-w_{q0}} \right) = 2k_n y. \quad (2.86)$$

$$\ln \frac{(l+a)(l-w_{q0})}{(l-a)(l+w_{q0})} = -4lk_n y.$$

$$\frac{(l+a)(l-w_{q0})}{(l-a)(l+w_{q0})} = e^{-4lk_n y}.$$

$$l(l-w_{q0}) + a(l-w_{q0}) = e^{-4lk_n y} l(l+w_{q0}) - e^{-4lk_n y} a(l+w_{q0}).$$

$$a \left[(l-w_{q0}) + e^{-4lk_n y} (l+w_{q0}) \right] = -e^{-4lk_n y} l(l+w_{q0}) - l(l-w_{q0}).$$

Так как $a = (w_B - w_{q2})$, то

$$w_{q2} = w_B - \frac{-e^{-4lk_n y} l(l+w_{q0}) - l(l-w_{q0})}{(l-w_{q0}) + e^{-4lk_n y} (l+w_{q0})}. \quad (2.87)$$

Подставляем в уравнение (2.87) все известные величины, и тогда скорость равна:

$$w_{\text{ч2}} = w_{\text{в}} - \frac{e^{\sqrt{\frac{g}{k_{\text{п}}}} k_{\text{п}} y} \sqrt{\frac{g}{k_{\text{п}}}} \left(\sqrt{\frac{g}{k_{\text{п}}}} + w_{\text{ч0}} \right) - \sqrt{\frac{g}{k_{\text{п}}}} \left(\sqrt{\frac{g}{k_{\text{п}}}} - w_{\text{ч0}} \right)}{\left(\sqrt{\frac{g}{k_{\text{п}}}} - w_{\text{ч0}} \right) + e^{\sqrt{\frac{g}{k_{\text{п}}}} k_{\text{п}} y} \left(\sqrt{\frac{g}{k_{\text{п}}}} + w_{\text{ч0}} \right)}. \quad (2.88)$$

Таким образом, во впускной части турбулизирующей вставки происходит поперечное «сжатие» двухкомпонентного материаловоздушного потока и приближение его к центру. При этом аэродинамическое сопротивление и механическое сопротивление трения транспортируемого материала о поверхность незначительны вследствие его плавного сужения [114]. Соответственно, скорости периферийных слоев потока возрастают и выравниваются по всей площади поперечного сечения конфузора. На выходе из конфузора образуется внезапное расширение диффузором турбулизирующей вставки, которое вызывает образование вихревых потоков транспортируемого воздуха по всему поперечному сечению входного трубопровода [138]. При этом образуются и отдельные вихри с отрицательным градиентом скорости. Все это вызывает интенсивное перемешивание транспортируемого материала с воздухом и формирование однородной материаловоздушной смеси (рис. 2.17).

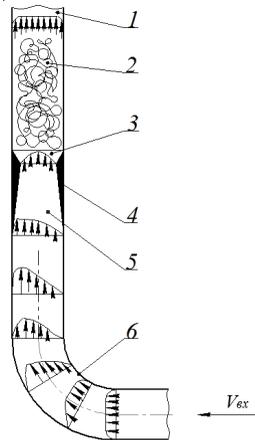


Рис. 2.17. Поля скоростей в распределителе с турбулизирующей вставкой: 1 – вход в распределительную головку; 2 – вихревая зона; 3 – диффузорная часть вставки; 4 – турбулизирующая вставка; 5 – конфузурная часть вставки; 6 – отвод

Исследованиями установлено, что для равномерного распределения материала по отводящим патрубкам на входе в распределительную головку поток материало-воздушной смеси должен стабилизироваться [72].

Это требование выполняется при расстоянии между вставкой и входом в распределительную головку не менее 4 диаметров вертикальной колонны.

2.6. Обоснование основных конструктивных параметров направителя

Для сохранения высокой равномерности распределения посевного материала по поперечному сечению в распределительной головке и далее в семяпроводах необходимо, чтобы каждая частица с наименьшими потерями энергии и за кратчайшее время после касания с внутренней поверхностью распределительной головки переместилась к отводящему патрубку. Таким образом, необходимо, чтобы частица массой m переместилась из точки A в точку B с минимальными затратами энергии и за кратчайшее время. В качестве направителя использовался остроконечный конус, который при условии равномерной подачи посевного материала в распределительную головку повышает равномерность распределения посредством создания направленных в сторону отводящих патрубков вееров отраженных частиц и уменьшает травмирование частиц посевного материала (рис. 2.18).

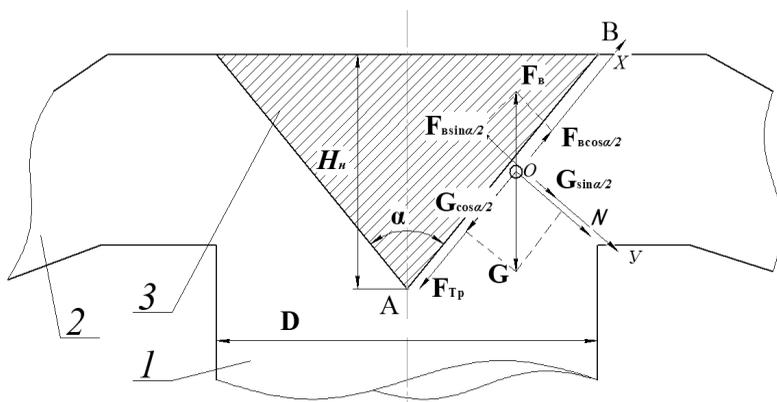


Рис. 2.18. Схема сил, действующих на частицу, расположенную на внутренней поверхности распределительной головки:
1 – входной трубопровод; 2 – отводящий патрубок; 3 – направитель

Основным геометрическим параметром направителя при заданном диаметре входного трубопровода является угол α у вершины конуса. Рациональным будет такой угол при вершине, при котором отраженные от направителя частицы посевного материала попадут непосредственно в отводящие патрубки. Рассмотрим траекторию движения частицы по направителю.

На частицу, расположенную на прямой АВ, действуют следующие силы: сила тяжести G , сила трения $F_{\text{тр}}$, сила нормальной реакции поверхности N и сила воздействия воздушного потока $P_{\text{в}}$. Угол наклона прямой АВ к оси входного трубопровода равен $\alpha/2$. После принятия частицы материальной точкой в этой точке О располагаются координатные оси: O_x – параллельно прямой АВ, а O_y – перпендикулярно.

Соответствующие уравнения для условия равновесия частицы будут иметь вид:

$$P_{\text{в}} \cos \frac{\alpha}{2} - F_{\text{тр}} - G \cos \frac{\alpha}{2} = 0. \quad (2.89)$$

$$N + G \sin \frac{\alpha}{2} - P_{\text{в}} \sin \frac{\alpha}{2} = 0. \quad (2.90)$$

Величину аэродинамической силы при развитом турбулентном движении можно определить по выражению (2.16).

С другой стороны, сила трения:

$$F_{\text{тр}} = f_{\text{тр}} N, \quad (2.91)$$

где $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения частицы о поверхность распределительной головки; N – сила нормальной реакции поверхности распределительной головки на частицу, N .

В любой момент времени t на частицу действуют следующие силы: сила тяжести G , сила трения $F_{\text{тр}}$, сила воздействия воздушного потока $P_{\text{в}}$ и сила нормальной реакции поверхности N . Так как частица движется по поверхности распределительной головки по оси O_x , составим дифференциальное уравнение движения по этому направлению, учитывая, что в направлении оси O_y силы уравновешиваются:

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = P_B \cos \frac{\alpha}{2} - F_{\text{тр}} - G \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (2.92)$$

Так как сила нормальной реакции (из уравнения (2.90))

$$N = P_B \sin \frac{\alpha}{2} - G \sin \frac{\alpha}{2},$$

то сила трения

$$F_{\text{тр}} = f_{\text{тр}} (P_B \sin \frac{\alpha}{2} - G \sin \frac{\alpha}{2}).$$

Подставив в выражение (2.92) значение составляющих сил, получим следующее дифференциальное уравнение:

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = P_B \cos \frac{\alpha}{2} - f_{\text{тр}} (P_B \sin \frac{\alpha}{2} - G \sin \frac{\alpha}{2}) - G \cos \frac{\alpha}{2},$$

или

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = 0,3mk_{\text{п}} w_{\text{в}}^2 \cos \frac{\alpha}{2} - f_{\text{тр}} (0,3mk_{\text{п}} w_{\text{в}}^2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2} - mg \sin \frac{\alpha}{2}) - mg \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (2.93)$$

После деления всех членов на m и замены выражения $0,3k_{\text{п}} w_{\text{в}}^2 = a$, уравнение (2.93) запишем в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = a \cos \frac{\alpha}{2} - g \cos \frac{\alpha}{2} - f_{\text{тр}} a \sin \frac{\alpha}{2} + f_{\text{тр}} g \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (2.94)$$

После преобразований уравнение (2.94) примет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = (a - g) \cos \frac{\alpha}{2} - (a - g) (f_{\text{тр}} \sin \frac{\alpha}{2}),$$

и после вынесения общего множителя $(a - g)$ получим:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = (a - g) (\cos \frac{\alpha}{2} - f_{\text{тр}} \sin \frac{\alpha}{2}). \quad (2.95)$$

Решение уравнения (2.95) непосредственным интегрированием позволит получить следующие выражения:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = (a - g) \left(\cos \frac{\alpha}{2} - f_{\text{тр}} \sin \frac{\alpha}{2} \right) t + C_3, \quad (2.96)$$

$$x = \frac{1}{2} (a - g) \left(\cos \frac{\alpha}{2} - f_{\text{тр}} \sin \frac{\alpha}{2} \right) t^2 + C_4, \quad (2.97)$$

где C_3 и C_4 – постоянные интегрирования.

Постоянные интегрирования C_3 и C_4 будут определяться из начальных условий: при $t = 0$, $x = 0$ и $\frac{\partial x}{\partial t} = 0$, что при подстановке в выражения (2.96) и (2.97) дает следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} (a - g) \left(\cos \frac{\alpha}{2} - f_{\text{тр}} \sin \frac{\alpha}{2} \right) 0 + C_3 = 0, \\ \frac{1}{2} (a - g) \left(\cos \frac{\alpha}{2} - f_{\text{тр}} \sin \frac{\alpha}{2} \right) 0^2 + C_4 = 0. \end{cases} \quad (2.98)$$

Решив систему уравнений (2.98), получим постоянные интегрирования: $C_3 = C_4 = 0$.

После подстановки полученных значений постоянных интегрирования в уравнение (2.97) определим закон движения частицы по поверхности распределительной головки:

$$x = \frac{1}{2} (a - g) \left(\cos \frac{\alpha}{2} - f_{\text{тр}} \sin \frac{\alpha}{2} \right) t^2. \quad (2.99)$$

Время движения частицы определим из уравнения (2.99):

$$t = \sqrt{\frac{2x}{(a - g) \left(\cos \frac{\alpha}{2} - f_{\text{тр}} \sin \frac{\alpha}{2} \right)}}. \quad (2.100)$$

Анализ выражения (2.100) показывает, что снижение времени движения частицы может быть обеспечено уменьшением пути движения x , а также увеличением выражения в знаменателе:

$$(a - g) \left(\cos \frac{\alpha}{2} - f_{\text{тр}} \sin \frac{\alpha}{2} \right) \longrightarrow \max . \quad (2.101)$$

Первый сомножитель выражения (2.101) представляет собой разность ускорений частицы от усилия воздушного потока и силы тяжести $(a - g)$. Так как для конкретных условий параметры воздушного потока должны оставаться постоянными, то $(a - g) = \text{const}$, но скорость воздушного потока должна выбираться максимальной из условия неповреждаемости транспортируемого материала. Другие параметры, определяющие ускорение a , влияют менее значимо, но более крупные частицы с большим коэффициентом аэродинамического сопротивления будут перемещаться быстрее.

Существенное влияние на время движения частицы будет оказывать второй сомножитель выражения (2.101), отражающий влияние угла наклона образующей конуса и коэффициент трения материала частицы о поверхность:

$$\left(\cos \frac{\alpha}{2} - f_{\text{тр}} \sin \frac{\alpha}{2} \right) \longrightarrow \max . \quad (2.102)$$

Для исследования выражения (2.102) на наличие максимума продифференцируем его и приравняем к нулю:

$$\left(\cos \frac{\alpha}{2} - f_{\text{тр}} \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \left(f_{\text{тр}} \cos \frac{\alpha}{2} - \sin \frac{\alpha}{2} \right) = 0 .$$

Тогда

$$\alpha = 2 \arctg f_{\text{тр}} . \quad (2.103)$$

Проверка выявленного экстремума выражения (2.102) путем нахождения второй производной $\left(\cos \frac{\alpha}{2} - f_{\text{тр}} \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \left(-f_{\text{тр}} \sin \frac{\alpha}{2} - \cos \frac{\alpha}{2} \right) \leq 0$ подтверждает, что в выражении (2.102) в точке $\alpha = 2 \arctg f_{\text{тр}}$ имеется максимум.

Анализ данного выражения позволил определить, что рациональный угол при вершине направителя, зависящий от коэффициента трения, для зерновых культур находится в диапазоне $\alpha = 37^\circ \dots 46^\circ$, для зернобобовых культур $\alpha = 34^\circ \dots 44^\circ$. Исходя

из данных диапазонов угла α можно определить, высота направляющего H_n для зерновых культур находится в диапазоне 165...209 мм, для зернобобовых культур $H_n = 173...229$ мм.

2.7. Определение аэродинамического сопротивления горизонтальной и вертикальной пневматических систем высева и расчет параметров вентилятора

Пневматическая система высева должна обеспечивать перемещение воздуха по пневмопроводу, забор посевного материала в зоне эжекторного питателя, перемещение двухкомпонентного потока по пневмоматериалопроводу, а также перемещение по распределительному устройству и распределение его по сошникам.

Выбору типа вентилятора для пневматических высевающих систем зерновых сеялок посвящены работы И. Е. Внукова, В. И. Скорлякова, М. П. Калинушкина [139–141], в которых рассмотрены положительные и отрицательные стороны применяемых вентиляторов в посевных машинах основных мировых производителей.

В основном применяются центробежные вентиляторы двух типов: первый – с лопатками рабочего колеса, направленными вперед, и второй – с лопатками рабочего колеса, направленными назад, в направлении его вращения. Вентиляторы первого типа имеют пологую аэродинамическую характеристику, т. е. с увеличением расхода воздуха давление воздушного потока, достигающее 10 кПа, изменяется незначительно, а у второго, развивающего давление до 5 кПа, – резко падает (крутопадающая характеристика). Первый тип, более быстроходный и менее габаритный, хотя более энергоемкий по сравнению со вторым, находит широкое применение в пневматических системах высева.

В рассматриваемой системе высева предпочтительное применение имеет первый тип, так как при совместном высева семян зерновых культур с припосевной дозой гранулированных фосфорных удобрений общая массовая нагрузка увеличивается на 25 %...30 % (максимальная норма высева семян с удобрениями достигает 500 кг/га). Это вызывает повышение аэродинамического сопротивления в транспортирующей сети, приводящее к потере давления и снижению скорости транспортирования посевного материала, от которой зависит равномерность распределения его по сошникам. Кроме этого давление

таких вентиляторов менее чувствительно к изменению частоты вращения рабочего колеса, которое неизбежно с приводом его от вала отбора мощности или гидросистемы энергетического средства.

Потребляемая мощность для привода вентилятора определяется исходя из расхода воздуха и развиваемого давления воздушного потока [72]. Необходимое давление, развиваемое вентилятором, определяется по выражению

$$P_{\text{Вент}} = \frac{\sum \Delta P}{1 - \frac{\Delta P}{10^5}}, \quad (2.104)$$

где ΔP – общие потери давления, Па.

Общие потери давления равны сумме расчетных и неучтенные потерь. Величина неучтенных потерь принимается до 10 %...15 % от расчетных.

Тогда потребляемая мощность определяется по выражению

$$N_p = \frac{Q_{\text{общ}} P_B}{1000 \eta_B \eta_{\text{пр}}}, \quad (2.105)$$

где $Q_{\text{общ}}$ – требуемый расход воздуха в сети, м³/ч; η_B – КПД вентилятора; $\eta_{\text{пр}}$ – КПД привода вентилятора.

Учет мощности на привод вентилятора необходим для расчета энергетического баланса при комплектовании посевных агрегатов. Однако основным эксплуатационным показателем процесса пневмотранспортирования считаются удельные затраты энергии на перемещение единицы массы материала в единицу времени. Этот критерий позволяет дать физическую оценку в отличие от КПД, не имеющего физического смысла [142].

Удельные энергетические затраты подсчитываются по энергии воздушного потока и концентрации материаловоздушной смеси:

$$N_{\text{уд}} = \frac{0,01}{\mu} \left(\frac{P_{\text{см}}}{\rho_B} + \frac{w_{\text{ср}}^2}{2g} \right), \quad (2.106)$$

где $P_{\text{см}}$ – давление воздуха с транспортируемой смесью, Па;

ИЛИ

$$N_{уд} = \frac{0,01}{\mu} \left(\frac{P_0}{\rho_B} (1 + k_{см}\mu) + \frac{w_{ср}^2}{2g} \right). \quad (2.107)$$

где $k_{см}$ – коэффициент, характеризующий вид транспортируемого материала.

Этот показатель служит для сравнения энергетической эффективности работы питателей эжекторного типа при максимальной их производительности. Схема пневматической системы высева представлена на рис. 2.19.

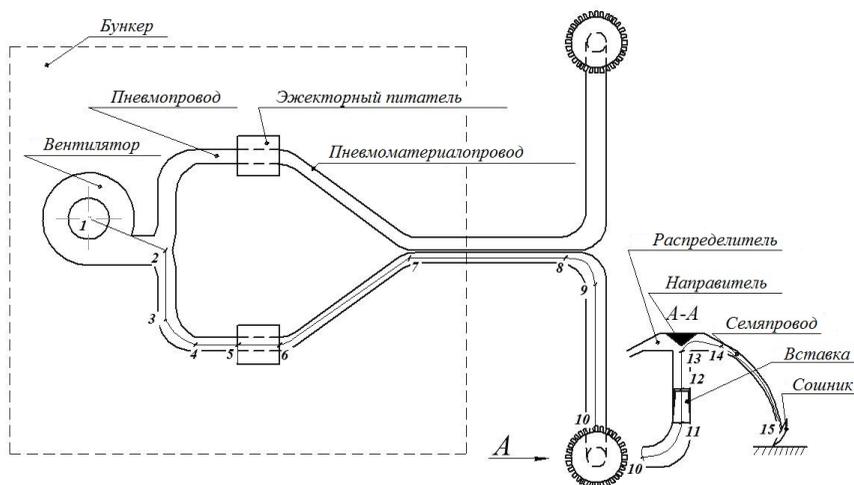


Рис. 2.19. Расчетная схема пневматической системы высева зерновой сеялки

Для проведения расчета вся пневматическая система условно была разделена на следующие участки:

- участок 1–2 – вентилятор;
- участок 2–3 – прямой цилиндрический пневмопровод;
- участок 3–4 – колено круглого сечения (отвод);
- участок 4–5 – прямой цилиндрический пневмопровод;
- участок 5–6 – эжекторный питатель;
- участок 6–7 – прямой цилиндрический пневмоматериалопровод;
- участок 7–8 – прямой цилиндрический пневмоматериалопровод;

- участок 8–9 – отвод;
- участок 9–10 – прямой цилиндрический пневмоматериалопровод;
- участок 10–11 – отвод;
- участок 11–12 – турбулизирующая вставка;
- участок 12–13 – вертикальная колонна распределителя;
- участок 13–14 – распределительная головка;
- участок 14–15 – семяпровод.

Исходные данные для расчета пневматической системы высева зерновой сеялки представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Исходные данные для расчета пневматической системы высева зерновой сеялки

| Наименование участка | Вид участка | Основные геометрические размеры | Скорости воздушного потока | Безразмерные коэффициенты местного аэродинамического сопротивления и потерь на трение |
|----------------------|------------------------------------|---|----------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1–2 | Вентилятор | | | Потери давления не рассчитываются |
| 2–3 | Прямой цилиндрический пневмопровод | $l_{(2-3)} = 0,43$ м $D_{(2-3)} = 0,14$ м | $w_{B(2-3)} = 28$ м/с | $\lambda_{(2-3)} = 0,015$ |
| 3–4 | Отвод | $D_{(3-4)} = 0,14$ м $r_{(3-4)} = 0,33$ м $\varphi_{(3-4)} = 90^\circ$ | $w_{B(3-4)} = 28$ м/с | $\lambda_{(3-4)} = 0,015$ $\zeta_{(3-4)} = 0,13$ |
| 4–5 | Прямой цилиндрический пневмопровод | $l_{(4-5)} = 0,43$ м $D_{(4-5)} = 0,14$ м | $w_{B(4-5)} = 28$ м/с | $\lambda_{(4-5)} = 0,015$ |
| 5–6 | Эжекторный питатель | $\beta_n = 14^\circ$ $F_1 = 0,14$ м ² $F_2 = 0,1$ м ² | $w_{B(5-6)} = 28$ м/с | $\lambda_{(5-6)} = 0,015$ $\zeta_{K(5-6)} = 0,075$ $\zeta_{D(5-6)} = 0,62$ $\zeta_{Y(5-6)} = 0,15$ |
| 6–7 | Прямой цилиндрический пневмопровод | $l_{(6-7)} = 0,43$ м $D_{(6-7)} = 0,14$ м | $w_{B(6-7)} = 26,1$ м/с | $\lambda_{(6-7)} = 0,015$ |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------|-------------------------------------|---|-------------------------|--|
| 7–8 | Прямой цилиндрический пневмопровод | $l_{(7-8)} = 0,43$ м $D_{(7-8)} = 0,14$ м | $w_{B(7-8)} = 26,1$ м/с | $\lambda_{(7-8)} = 0,015$ |
| 8–9 | Отвод | $D_{(8-9)} = 0,14$ м $r_{(8-9)} = 0,5$ м $\varphi_{(8-9)} = 90^\circ$ | $w_{B(8-9)} = 26,1$ м/с | $\lambda_{(8-9)} = 0,015$ $\zeta_{(8-9)} = 0,1$ $K'_{отв.} = 0,012$ |
| 9–10 | Прямой цилиндрический пневмопровод | $l_{(9-10)} = 2,2$ м $D_{(9-10)} = 0,14$ м | $w_{B(9-10)} = 25$ м/с | $\lambda_{(9-10)} = 0,016$ |
| 10–11 | Отвод | $D_{(10-11)} = 0,14$ м $r_{(10-11)} = 0,4$ м $\varphi_{(10-11)} = 90^\circ$ | $w_{B(10-11)} = 25$ м/с | $\lambda_{(10-11)} = 0,016$ $\zeta_{(10-11)} = 0,12$ $K'_{отв.} = 0,013$ |
| 11–12 | Турбулизирующая вставка | $\beta = 15^\circ$ $F_1 = 0,14$ м ² $F_2 = 0,088$ м ² | $w_{B(11-12)} = 23$ м/с | $\lambda_{(11-12)} = 0,016$ $\zeta_{ск} = 0,086$ $\zeta_{дл} = 1,1$ |
| 12–13 | Вертикальная колонна распределителя | $l_{(12-13)} = 0,57$ м $D_{(12-13)} = 0,14$ м | $w_{B(12-13)} = 25$ м/с | $\lambda_{(12-13)} = 0,016$ |
| 13–14 | Распределительная головка | $D_{(13-14)} = 0,14$ м $r_{(13-14)} = 0,2$ м $\varphi_{(13-14)} = 90^\circ$ | $w_{B(13-14)} = 25$ м/с | $\lambda_{(13-14)} = 0,016$ $\zeta_{(13-14)} = 0,11$ $K'_{отв.} = 0,01$ |
| 14–15 | Семяпровод | | | Потери давления не рассчитываются |

На участке 1–2 (вентилятор) потери давления не учитываются [143, 144].

На участке 2–3 (прямой цилиндрический пневмопровод) потери давления будут состоять только из потерь давления на трение воздуха о стенки пневмопровода:

$$P_{(2-3)} = P_{TP(2-3)} l_{(2-3)}, \quad (2.108)$$

где $P_{TP(2-3)}$ – удельное сопротивление воздуха на участке 2–3, Па/м; $l_{(2-3)}$ – длина участка 2–3, м.

При этом удельное сопротивление движения воздуха вследствие трения о стенки пневмопровода будет равно:

$$P_{\text{TP}(2-3)} = \frac{\lambda_{2-3} \rho_{\text{в}} w_{\text{в}(2-3)}^2}{2D_{(2-3)}}, \quad (2.109)$$

где $\lambda_{(2-3)}$ – коэффициент сопротивления на участке 2–3; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м³; $w_{\text{в}(2-3)}$ – скорость воздуха на участке, м/с; $D_{(2-3)}$ – диаметр пневмопровода на участке, м.

Для технических расчетов коэффициент сопротивления [145]

$$\lambda = \frac{0,35}{\text{Re}^{0,25}}, \quad (2.110)$$

где Re – число Рейнольдса.

Скорость воздушного потока $w_{\text{в}}$ для транспортирования посевного материала в системе должна находиться в пределах от 17 до 28 м/с [71]. На участке 3–4 колено круглого сечения (отвод) с углом закругления пневмопровода $\varphi_{(3-4)} = 90^\circ$, диаметром $D_{(3-4)} = 0,14$ м и радиусом поворота $r_{(3-4)} = 0,33$ м, безразмерный коэффициент местного сопротивления будет равен $\zeta_{(3-4)} = 0,13$ [145]. Потери давления на участке 3–4 будут состоять из потерь на трение и преодоление местного сопротивления:

$$P_{(3-4)} = \frac{\zeta_{(3-4)} \rho_{\text{в}} w_{\text{в}(3-4)}^2}{2} + P_{\text{TP}(3-4)} l_{(3-4)}, \quad (2.111)$$

где $w_{\text{в}(3-4)}$ – скорость воздуха на участке, м/с; $P_{\text{TP}(3-4)}$ – удельное сопротивление воздуха на участке 3–4, Па/м; $l_{(3-4)}$ – длина участка 3–4, м.

На участке 4–5 (прямой цилиндрический пневмопровод) потери давления на преодоление сопротивления от трения воздуха о стенки

$$P_{4-5} = P_{\text{TP}(4-5)} l_{(4-5)}. \quad (2.112)$$

Общие потери давления на участке 5–6 (эжекторный питатель) складываются из внутренних потерь и потерь на разгон посевного материала до скорости транспортирования на выходе из диффузора [125]:

$$P_{(5-6)} = P_{\text{ВН}} + P_{\text{РМ}}, \quad (2.113)$$

где $P_{\text{ВН}}$ – внутренние потери в питателе при прохождении через него воздушного потока, Па; $P_{\text{РМ}}$ – потери на разгон посевного материала до скорости транспортирования, Па.

Внутренние потери в питателе складываются из потерь в конфузоре, диффузоре и загрузочной горловине:

$$P_{\text{ВН}} = P_{\text{К}} + P_{\text{Д}} + P_{\text{У}}, \quad (2.114)$$

где $P_{\text{К}}$ – потери давления в конфузоре, Па; $P_{\text{Д}}$ – потери давления в диффузоре, Па; $P_{\text{У}}$ – потери давления, связанные с утечками воздуха через загрузочную горловину эжектора, Па.

Потери для конического конфузора оцениваются коэффициентом сопротивления $\zeta_{\text{К}(5-6)}$, который зависит от угла сужения и составляет 0,075 [145].

Потери давления в диффузоре, при коэффициенте местного сопротивления $\zeta_{\text{Д}(5-6)} = 0,62$ [145]:

$$P_{\text{Д}(5-6)} = \frac{\zeta_{\text{Д}(5-6)} P_{\text{В}} w_{\text{В}(5-6)}^2}{2}, \quad (2.115)$$

где $w_{\text{В}(5-6)}$ – скорость воздуха на участке, м/с.

Потери давления, связанные с утечкой воздуха через загрузочную горловину эжектора при коэффициенте местного сопротивления $\zeta_{\text{У}(5-6)} = 0,15$ [145]:

$$P_{\text{У}(5-6)} = \frac{\zeta_{\text{У}(5-6)} P_{\text{В}} w_{\text{В}(5-6)}^2}{2}. \quad (2.116)$$

Потери давления на разгон материала найдены из дифференциального уравнения количества движения и импульса сил на разгонном участке [85]:

$$P_{\text{РМ}} = \left(\frac{V_{\text{М}}}{w_{\text{В}}} - \frac{V_{\text{М0}}}{w_{\text{В}}} \right) \mu_{\text{Р}} P_{\text{В}} w_{\text{В}(5-6)}^2, \quad (2.117)$$

где V_M – скорость материала на выходе из питателя, м/с; V_{M0} – скорость материала при загрузке в пневматическую систему, м/с; μ – весовая концентрация смеси, кг/кг.

Если начальная скорость материала равна нулю, что чаще всего бывает при его загрузке в пневматическую систему, тогда

$$P_{PM} = \frac{V_M}{w_B} \mu \rho_B w_{B(5-6)}^2. \quad (2.118)$$

На участке 6–7 (прямой цилиндрический пневмоматериалопровод) потери давления будут состоять из потерь давления на трение смеси воздуха и посевного материала в горизонтальной части пневмоматериалопровода:

$$P_{(6-7)} = P_{TP.B.\Gamma(6-7)} + P_{TP.M.\Gamma(6-7)}, \quad (2.119)$$

где $P_{TP.B.\Gamma(6-7)}$ – потери давления на трение воздуха в горизонтальной части пневмоматериалопровода, Па; $P_{TP.M.\Gamma(6-7)}$ – потери давления на трение посевного материала в горизонтальной части пневмоматериалопровода, Па.

Потери давления на трение воздуха в горизонтальной части пневмоматериалопровода

$$P_{TP.B.\Gamma(6-7)} = P_{TP(6-7)} l_{(6-7)}. \quad (2.120)$$

Потери давления на трение посевного материала в горизонтальной части пневмоматериалопровода можно определить по формуле [145]

$$P_{TP.M.\Gamma(6-7)} = K_\Gamma \mu P_{TP.B(6-7)}, \quad (2.121)$$

где K_Γ – опытный коэффициент.

На горизонтальном участке для материала со скоростью витания более 6 м/с опытный коэффициент [145]

$$K_\Gamma = \frac{0,15 D_{(6-7)}}{w_{B(6-7)}^{1,25}}, \quad (2.122)$$

где $w_{B(6-7)}$ – скорость воздуха на участке, м/с.

Прямой участок 7–8 будет иметь только потери на преодоление трения смеси воздуха и материала о стенки пневмоматериалопровода, аналогичные потерям на участке 6–7, с учетом большей длины пневмоматериалопровода.

На участке 8–9 потери давления на перемещение смеси воздуха и посевного материала в отводе [145]

$$P_{(8-9)} = P_{B(8-9)}(1 + K_{\text{отв}} \mu), \quad (2.123)$$

где $P_{B(8-9)}$ – потери на перемещение воздуха в отводе с углом поворота $\varphi_{(8-9)} = 90^\circ$, диаметром 0,14 м и радиусом поворота $r_{(8-9)} = 0,5$ м; безразмерный коэффициент местного сопротивления будет равен $\zeta_{(8-9)} = 0,1$ [145]; $K_{\text{отв}}$ – коэффициент, учитывающий потери давления на транспортирование посевного материала в отводе, изменяющем направление в горизонтальной плоскости, $K_{\text{отв}} = 0,012$.

Прямой участок 9–10 будет иметь потери на преодоление трения смеси воздуха и материала о стенки пневмоматериалопровода, аналогичные потерям на участке 7–8, с учетом большей длины пневмоматериалопровода, а также из потерь давления на разгон посевного материала после отвода [145]:

$$P_{PM(9-10)} = \beta_1 K_1 \mu H_d, \quad (2.124)$$

где β_1 – коэффициент разгона, для горизонтального участка $\beta_1 = 0,73$ [145]; K_1 – коэффициент, равный 0,8 [145]; H_d – динамическое давление, Па.

На участке 10–11 (отвод распределителя) потери давления на перемещение смеси воздуха и посевного материала

$$P_{(10-11)} = P_{B(10-11)}(1 + K'_{\text{отв}} \mu), \quad (2.125)$$

где $P_{B(10-11)}$ – потери на перемещение воздуха в отводе с углом поворота $\varphi_{(10-11)} = 90^\circ$, диаметром 0,14 м и радиусом поворота $r_{(10-11)} = 0,4$ м; безразмерный коэффициент местного сопротивления $\zeta_{(10-11)} = 0,12$ [145]; $K'_{\text{отв}}$ – коэффициент, учитывающий потери давления на транспортирование посевного материала в отводе, изменяющем направление с горизонтали на вертикаль, $K'_{\text{отв}} = 0,013$.

На участке 11–12 (турбулизирующая вставка) потери давления будут состоять из внутренних потерь в конфузоре и диффузоре:

$$P_{(11-12)} = P_{к.в} + P_{д.в}, \quad (2.126)$$

где $P_{к.в}$ – потери давления в конфузоре вставки, Па; $P_{д.в}$ – потери давления в диффузоре вставки, Па.

Для конического конфузора потери давления будут состоять из потерь на трение и преодоление местного сопротивления:

$$P_{к.в} = \frac{\zeta_{к} \rho_{в} w_{в.к}^2}{2} + P_{тр.к} l_{к}, \quad (2.127)$$

где $\zeta_{к}$ – коэффициент сопротивления конического конфузора; $w_{в.к}$ – скорость воздуха в конфузоре, м/с; $P_{тр.к}$ – удельное сопротивление в конфузоре, Па/м; $l_{к}$ – длина конфузора, м.

Коэффициент сопротивления для конического конфузора

$$\zeta_{к} = \frac{\lambda}{\sin \frac{\beta}{2}} \left(\frac{n_y^2 - 1}{n_y^2} \right), \quad (2.128)$$

где n_y – уточненная степень поджатия двухкомпонентного потока, определенная при обосновании основных параметров турбулизирующей вставки (формула (2.26)); β – угол сужения конфузора, град.

Потери давления в диффузоре турбулизирующей вставки, при коэффициенте местного сопротивления $\zeta_{д} = 1,1$ [145], будут равны

$$P_{д.в} = \frac{\zeta_{д} \rho_{в} w_{в.д}^2}{2} + P_{тр.д} l_{д}, \quad (2.129)$$

где $w_{в.д}$ – скорость воздуха в диффузоре, м/с; $P_{тр.д}$ – удельное сопротивление в диффузоре, Па/м; $l_{д}$ – длина диффузора, м.

На участке 12–13 (вертикальная колонна распределителя) потери давления будут состоять из потерь на трение смеси воздуха и посеv-

ного материала о стенки распределителя, а также потерь давления на разгон материала после турбулизирующей вставки:

$$P_{(12-13)} = P_{\text{ТР.В}(12-13)} + P_{\text{ТР.М}(12-13)} + P_{\text{РМ}(12-13)}, \quad (2.130)$$

где $P_{\text{ТР.В}(12-13)}$ – потери давления на трение воздуха в вертикальной части распределителя, Па; $P_{\text{ТР.М}(12-13)}$ – потери давления на трение посевного материала в вертикальной части распределителя, Па; $P_{\text{РМ}(12-13)}$ – потери давления на разгон материала после турбулизирующей вставки, Па.

Потери давления на трение воздуха в вертикальной части распределителя

$$P_{\text{ТР.В}(12-13)} = \frac{\lambda_{(12-13)} \rho_{\text{в}} w_{\text{в}(12-13)}^2 l_{(12-13)}}{2D_{(12-13)}}, \quad (2.131)$$

где $\lambda_{(12-13)}$ – коэффициент сопротивления на участке; $w_{\text{в}(12-13)}$ – скорость воздуха на участке, м/с; $l_{(12-13)}$ – длина вертикального участка, м; $D_{(12-13)}$ – диаметр распределителя, м.

Потери давления на трение посевного материала в вертикальной части распределителя определялись [145]

$$P_{\text{ТР.М}(12-13)} = \frac{7,4 l_{(12-13)} \mu H_{\text{д}} c_1 c_2}{D_{(12-13)}}, \quad (2.132)$$

где c_1 и c_2 – справочные коэффициенты, $c_1 \approx 0,001$ и $c_2 \approx 0,6$ [88].

Потери давления на разгон материала после турбулизирующей вставки [145]

$$P_{\text{РМ}(12-13)} = 2,5 \mu H_{\text{д}} c_1 c_2. \quad (2.133)$$

На участке 13–14 (распределительная головка) расчет потерь давления будет аналогичен расчету для участка 10–11 с учетом изменения направления движения с вертикального на горизонтальное.

На участке 13–14 (распределительная головка) потери давления на перемещение смеси воздуха и посевного материала

$$P_{(13-14)} = P_{B(13-14)} (1 + K''_{\text{отв}} \mu), \quad (2.134)$$

где $P_{B(13-14)}$ – потери на перемещение воздуха в отводе с углом поворота $\varphi_{(13-14)} = 90^\circ$, диаметром 0,14 м и радиусом поворота $r_{(13-14)} = 0,2$ м; безразмерный коэффициент местного сопротивления будет равен $\zeta_{(13-14)} = 0,11$ [145]; $K''_{\text{отв}}$ – коэффициент, учитывающий потери давления на транспортирование посевного материала в отводе, изменяющем направление с вертикали на горизонталь, $K''_{\text{отв}} = 0,01$.

С учетом того, что посевной материал после распределительной головки поступает в сошники под действием собственного веса, потерями давления на участке 14–15 (семяпровод) можно пренебречь, так как семяпроводы имеют свободный выход в атмосферу.

Основные результаты выполненного расчета элементов пневматической системы высева зерновой сеялки представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Результаты расчета пневматической системы высева

| Наименование участка системы | Потери давления на преодоление сопротивления трения воздуха и посевного материала о стенки, Па | Аэродинамические потери давления на местных сопротивлениях, Па | Общие потери давления, Па |
|------------------------------|--|--|---------------------------|
| 1–2 | 0 | 0 | 0 |
| 2–3 | 21,67 | 0 | 21,67 |
| 3–4 | 16,63 | 61,15 | 77,78 |
| 4–5 | 12,6 | 0 | 12,6 |
| 5–6 | 34,6 | 830,73 | 865,33 |
| 6–7 | 48,17 | 0 | 48,17 |
| 7–8 | 65,69 | 0 | 65,69 |
| 8–9 | 15,33 | 41,14 | 56,47 |
| 9–10 | 94,28 | 17,7 | 111,98 |
| 10–11 | 42,86 | 43,51 | 86,37 |
| 11–12 | 12,69 | 195,52 | 208,21 |
| 12–13 | 24,43 | 26,88 | 51,31 |
| 13–14 | 10,72 | 41,25 | 51,97 |
| 14–15 | 0 | 0 | 0 |

Таким образом, общие потери давления воздушного потока с посевным материалом на преодоление сопротивления всей пневматической системы высева

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= P_{(1-2)} + P_{(2-3)} + P_{(3-4)} + P_{(5-6)} + P_{(6-7)} + P_{(7-8)} + P_{(8-9)} + \\
 &+ P_{(9-10)} + P_{(10-11)} + P_{(11-12)} + P_{(12-13)} + P_{(13-14)} + P_{(14-15)} = \quad (2.135) \\
 &= 21,67 + 77,78 + 12,6 + 865,33 + 48,17 + 65,69 + 56,47 + \\
 &+ 111,98 + 86,37 + 208,21 + 51,31 + 51,97 = 1657,55 \text{ Па.}
 \end{aligned}$$

В результате аналитического обзора общих аэродинамических закономерностей пневматического транспортирования определены основные факторы, оказывающие существенное влияние на характер протекания процесса на каждом участке пневматической системы высева. Это позволяет вносить эффективные конструктивные изменения, обеспечивающие выполнение технологического процесса на всех стадиях в соответствии с агротехническими требованиями.

ГЛАВА 3

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВЫСЕВА СЕМЯН

3.1. Программа исследований основных закономерностей технологического процесса пневматического высева семян

На процесс транспортирования посевного материала в пневматических системах высева и на качество его распределения по площади поля оказывают влияние большое количество факторов, и значения некоторых из них невозможно определить расчетным методом. Для проверки результатов теоретических исследований и более полного изучения и оптимизации процесса работы распределителя посевного материала вертикального или горизонтального типа необходимо проведение экспериментальных исследований.

На основании проведенных теоретических исследований можно сделать вывод о том, что на процесс распределения посевного материала оказывают влияние следующие факторы: длина и пространственное расположение пневмоматериалопровода, наличие фасонных частей, конструктивные параметры турбулизирующей вставки и направлятеля, скорость воздушного потока, норма высева, скорость движения сеялки, основные физико-механические и аэродинамические свойства посевного материала, которые необходимо учитывать при проведении исследований.

Анализ литературных источников и имеющихся устройств для распределения потока посевного материала показывает, что при исследовании распределителей потока материала изучают только качественную характеристику – неравномерность распределения семян по сошникам, описываемую коэффициентом вариации.

Целью проведения экспериментальных исследований является подтверждение теоретических выводов, а также оптимизация основных конструктивных параметров комбинированного распределительного устройства.

В связи с этим была разработана программа экспериментальных исследований, включающая:

- выявление априорным ранжированием факторов, оказывающих наибольшее влияние на качество распределения посевного материала;
- определение основных физико-механических свойств посевного материала;

– построение по результатам проведения полного факторного эксперимента поверхностей отклика, отражающих зависимость неравномерности распределения посевного материала от факторов, установленных в результате априорного ранжирования;

– проверка достоверности результатов теоретических исследований и определение оптимальных параметров распределителя.

Факторы, оказывающие влияние на качество распределения посевного материала по поверхности поля, условно подразделяют на две категории: первая – зависящие и вторая – независящие от конструкции и параметров элементов высевной системы. К факторам первой категории относятся параметры воздушного потока (скорость, расход и давление), геометрические параметры турбулизирующей вставки и направлятеля, проточной части питателя эжекторного типа, длина и пространственное расположение пневмоматериалопровода, параметры отражательной поверхности выравнивающего устройства и распределителя потока посевного материала. К факторам второй категории относятся погодные условия, физико-механические и аэродинамические свойства посевного материала, которые необходимо учитывать при проведении исследований.

Анализ литературных источников и имеющихся устройств для ввода материала в зону с избыточным давлением и распределителей потока посевного материала показывает, что при исследовании питателей требуется изучать количественную и качественную характеристики их рабочего процесса (пропускную способность, устойчивость высева и энергоемкость), а при исследованиях распределителей потока материала – только качественную (коэффициент вариации).

В этой связи были определены задачи экспериментальных исследований:

1. Изготовить экспериментальные (макетные) образцы элементов системы высева (турбулизирующей вставки и направлятеля распределителя вертикального типа, эжекторного питателя и выравнивающего устройства распределителя горизонтального типа).

2. Исследовать процесс работы турбулизирующей вставки:

а) влияние конструктивных параметров на пропускную способность вставки;

б) связь параметров вставки и направлятеля с неравномерностью распределения посевного материала по сошникам.

3. Исследовать процесс работы эжекторного питателя:
- а) влияние конструктивных параметров на пропускную способность эжекторного питателя;
 - б) зависимость потерь давления в питателе от конструктивных параметров;
 - в) связь параметров питателя с неравномерностью распределения посевного материала по сошникам.
4. Экспериментально определить влияние неравномерности дозирования материала дозаторами на общую неравномерность распределения посевного материала по сошникам и сравнить с результатами теоретических исследований.
5. Исследовать в лабораторных и полевых условиях зависимость продольной и поперечной неравномерности распределения материала от параметров выравнивающего устройства распределителей вертикального и горизонтального типов.
6. Определить энергопотребление вентилятора.

3.2. Исследование конструктивных и технологических параметров пневматического высевающего аппарата вертикального типа

3.2.1. Экспериментальная установка пневматического высевающего распределителя вертикального типа

Исследования проводились на экспериментальной установке, которая имитировала пневматическую систему высева централизованного дозирования посевного материала и была предназначена для исследования рабочего процесса вертикального распределительного устройства. (Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.1, а общий вид – на рис. 3.2.)

Установка состоит из электродвигателя, центробежного вентилятора высокого давления, бункера с дозатором катушечного типа для семян, питателя эжекторного типа, пневмопровода и пневмоматериалопровода диаметром 140 мм и длиной 5,6 м, 36-канального распределителя посевного материала вертикального типа, семяпроводов диаметром 32 мм, сборника семян. Привод дозатора осуществляется от электромотора через цепную передачу. Установка нормы высева производится изменением частоты вращения и (или) длины рабочей части катушки дозатора.

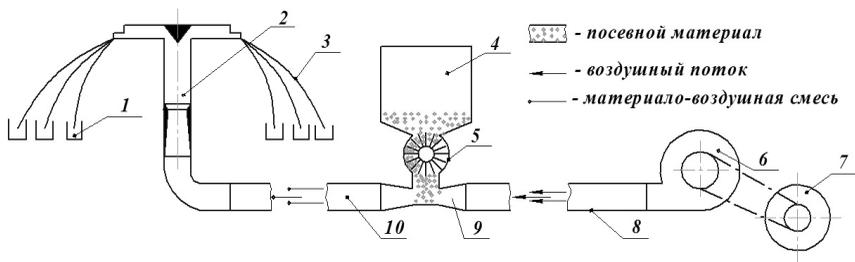
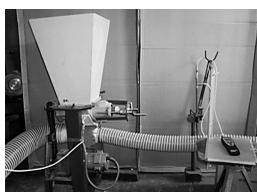
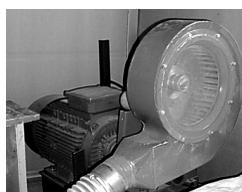


Рис. 3.1. Технологическая схема экспериментальной установки:
 1 – сборник семян; 2 – комбинированный распределитель; 3 – семяпровод;
 4 – бункер для семян; 5 – дозатор; 6 – вентилятор; 7 – электродвигатель;
 8 – пневмопровод; 9 – питатель эжекторного типа; 10 – пневмоматериалопровод



а



б



в

Рис. 3.2. Основные элементы экспериментальной установки:
 а – бункер семян с дозатором и эжекторным питателем;
 б – вентилятор; в – общий вид установки

Установка работает следующим образом. Вентилятор нагнетает воздух в пневмотранспортную магистраль, далее воздушный поток поступает в питатель эжекторного типа. Туда же из бункера дозатором подаются семена высеваемой культуры. Воздушный поток в питателе захватывает семена и далее по пневмоматериалопроводу транспортирует их к 36-канальному распределителю, где происходит деление потока посевного материала по семяпроводам, а из них – в сборник семян. Сбор семян производится в емкости индивидуально из каждого канала.

Для измерения параметров и контроля за процессом высева применялись следующие приборы: время отбора проб замерялось с помощью электронного секундомера, вес проб семян – с помощью электронных весов ВЭУ-6-1/2 (ТУ 25-7724-010–98). Скорость воздуха на входе в распределитель и динамическое давление измерялись с помощью трубки Пито и дифференциального манометра Testo-512. Для определения количества повторностей опыта при выявлении средней арифметической величины многократных измерений одного и того же объекта руководствовались следующими величинами: доверительной вероятностью α_d , т. е. вероятностью того, что значения измеряемой величины не выйдут за доверительные пределы $\pm\Delta x$; допустимой ошибкой ε , выраженной в долях среднеквадратичного отклонения δ_d . При проведении экспериментальных исследований принят достаточный уровень доверительной вероятности $\alpha_d = 0,95$. Из теории ошибок следует, что результаты измерений одной и той же величины лежат в пределах $\pm 3\delta_d$. Для заданной доверительной вероятности $\alpha_d = 0,95$ и предельной ошибки $\varepsilon = \pm 3\delta_d$ количество повторностей опыта принято равным $n = 3$ [80]. Для изучения рабочего процесса распределителя вертикального типа применительно к пневматическим системам высева централизованного дозирования зерновых сеялок разработан экспериментальный распределитель (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Общий вид экспериментального распределителя вертикального типа

В соответствии с программой планирования экспериментальных исследований непосредственно в вертикальной колонне распределителя монтировались турбулизирующая вставка с определенными геометрическими параметрами и направлятель (рис. 3.4).

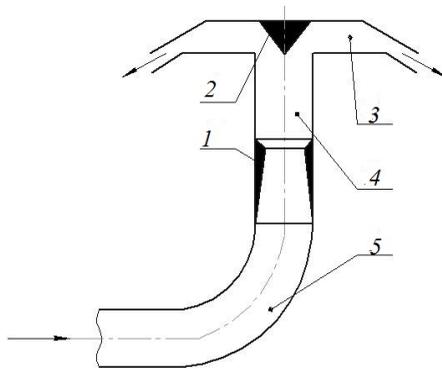


Рис. 3.4. Схема положения турбулизирующей вставки и направителя в комбинированном распределителе:

1 – турбулизирующая вставка; 2 – направитель;

3 – распределительная головка; 4 – вертикальная колонна; 5 – отвод

В процессе испытаний определялись параметры воздушного потока – средняя скорость и динамическое давление в системе. Замеры показателей производились с помощью трубки Пито и дифференциального манометра Testo-512 с трехкратной повторностью при установившемся режиме воздушного потока в течение 60 с. Замер производился на входе в отвод и непосредственно после турбулизирующей вставки на участке вертикальной колонны.

Оценка поперечной неравномерности высева производилась на лабораторной установке, имитирующей пневматическую систему высева централизованного дозирования с экспериментальными элементами системы (турбулизирующей вставкой конфузорно-диффузорной формы и конусным направителем), для определения оптимальных параметров вертикального распределителя и влияния его геометрических параметров на неравномерность распределения посевного материала по сошникам.

Внешний вид дополнительных элементов представлен на рис. 3.5.

Во время опытов посевной материал к питателю подавался дозатором с крупногабаритной желобчатой катушкой и по пневмоматериалопроводу транспортировался к распределителю. Для исследований использовались семена зерновых и зернобобовых культур. Катушечный дозатор обеспечивал производительность на зерновых культурах в диапазоне от 0,09 до 0,72 г/с, что соответствует норме высева от 30 до 450 кг/га.

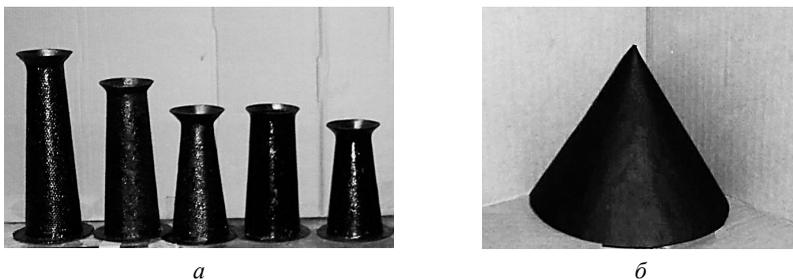


Рис. 3.5. Экспериментальные образцы дополнительных элементов:
а – турбулизирующие вставки; б – направитель

Подача материала выбиралась исходя из агротехнических норм высева данной культуры с учетом скорости движения сеялки по полю до 12 км/ч. Подача материала производилась дозаторами в течение 60 с через 30 с после пуска установки для стабилизации воздушного потока в системе. Для сбора семян из каждого семяпровода применялись мешочки равных размеров из материала, свободно пропускающего воздух, для создания одинакового гидравлического сопротивления. Семяпроводы были равной длины. Повторность опытов принималась трехкратной исходя из 95%-й надежности показаний как наиболее распространенной при агроинженерных исследованиях. Исследования проводились при значениях атмосферного давления, влажности и температуры воздуха, равных или близких к оптимальным. Посевной материал взвешивали на весах ВЭУ-6-1/2 (ТУ 25-7724-010-98).

3.2.2. Проведение натуральных испытаний

Для подтверждения теоретических выводов и результатов лабораторных исследований по определению неравномерности распределения частиц посевного материала между сошниками проводились сравнительные испытания экспериментальных образцов элементов системы высева на натуральных образцах посевных машин в производственных условиях. Натурные испытания проводились на опытном образце широкозахватной зерновой сеялки С-9, разработанной РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства».

Сеялка имела пневматическую высевашую систему централизованного дозирования с двумя 36-канальными распределителями вертикального типа. Дозаторы семян укомплектованы крупногабаритными желобчатыми катушками. Привод вентилятора осуществлялся от гидросистемы трактора, частота вращения рабочего колеса вентилятора находилась в пределах 3200...4250 мин⁻¹. При этом скорость воздушного потока составляла 17...28 м/с. Установка нормы высева зерна осуществлялась изменением длины рабочей части катушки.

Испытания проводились по следующей схеме. Высев осуществлялся на ½ рабочей ширины захвата сеялки, в нашем случае – 36 сошников. Навеска бралась из расчета посева 0,05 га (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Сеялка С-9, подготовленная к натурным испытаниям

Целью проведения натурных испытаний являлось определение коэффициента вариации как основного критерия, по которому оценивается качество работы распределителя, характеризующего неравномерность распределения частиц посевного материала по сошникам. Система высева была укомплектована экспериментальным образцом вертикального распределительного устройства с оптимальными конструктивными параметрами.

В качестве посевного материала использовались семена зерновых и зернобобовых культур. Посевной материал из каждого семяпровода высевали в специальные мешочки и взвешивали на весах ВЛКТ-500.

3.2.3. Методика проведения лабораторных исследований экспериментального пневматического высевающего распределителя вертикального типа

Методикой экспериментальных исследований предусматривалось выявление априорным ранжированием факторов, оказывающих наибольшее влияние на качество распределения посевного материала, определение физико-механических свойств посевного материала, а также неравномерности распределения посевного материала по сошникам опытного распределителя на лабораторной установке, имитирующей пневматическую систему высева, при варьировании факторов, оказывающих влияние на неравномерность.

При выполнении априорного ранжирования факторов, способных оказать влияние на качество распределения посевного материала по сошникам, широкому кругу специалистов в области посева предлагалось расположить потенциально значимые факторы в порядке убывания степени их влияния на выбранный параметр оптимизации (проранжировать). При этом использовались стандартные анкеты, в которых перечислены факторы, их размерности, области определения и порядковые номера (ранги). В случае, когда специалист затруднялся указать ранг для двух или нескольких расположенных рядом факторов, вводились так называемые «связанные ранги», которым присваивался один и тот же номер.

3.2.3.1. Методика определения физико-механических свойств посевного материала

При выборе сельскохозяйственных культур для проведения экспериментальных исследований основное внимание уделялось различию физико-механических свойств. Таким образом, в качестве образцов использовались семена зерновых и зернобобовых культур: пшеницы, ячменя, ржи, люпина и сои.

Линейные размеры посевного материала определялись путем обмера штангенциркулем ШЦ-I-125-0,05 (ГОСТ 166–89) партии из 100 семян каждой культуры, при этом замерялись длина, ширина и толщина семени. По средним значениям размеров рассчитывался эквивалентный диаметр

$$d_3 = \sqrt[3]{a_3 b_3 l_3}, \quad (3.1)$$

где a_3 , b_3 и l_3 – толщина, ширина и длина семени, м.

Масса 1000 семян определялась путем взвешивания партии зерен на электронных весах ВЭУ-6-1/2 с трехкратной повторностью. Влажность посевного материала определялась влагомером МГ-4.

Для определения коэффициента трения использовалась лабораторная установка, на которой определялись значения коэффициентов трения покоя $f_{\text{п}}$ и скольжения $f_{\text{с}}$. Коэффициент трения покоя определялся следующим образом. На наклонной площадке закреплялся образец материала, из которого изготавливался рабочий орган (лист стали). Площадке придавался угол, меньше угла статического трения. После этого, поворачивая наклонную площадку, фиксировали по угломеру значения углов, при которых начиналось движение пробы. Опыты проводились в трехкратной повторности для каждой культуры. Углы, которые были определены в ходе опыта, являются углами трения покоя $\varphi_{\text{п}}$. Зная угол $\varphi_{\text{п}}$, можно определить коэффициент трения

$$f_{\text{п}} = \text{tg } \varphi_{\text{п}} . \quad (3.2)$$

Схема установки для определения коэффициента трения представлена на рис. 3.7.

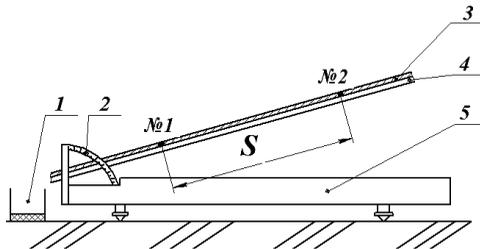


Рис. 3.7. Схема установки для определения коэффициента трения:
1 – семясборник; 2 – угломер; 3 – рабочий материал (сталь);
4 – наклонная площадка; 5 – основание

Коэффициент трения скольжения определялся по наиболее распространенной методике, когда рассматривается равноускоренное движение пробы семян по наклонной плоскости под действием силы тяжести. Уравнение движения тела по наклонной плоскости имеет следующий вид:

$$ma = F_{\text{тр}} + G + N , \quad (3.3)$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила трения, Н; G – вес пробы, кг; N – нормальная реакция опоры, Н.

Формулу для расчета коэффициента трения скольжения $f_{\text{трс}}$ можно вывести, спроецировав силы, действующие на тело, на ось OX :

$$ma = mg \sin \varphi - f_{\text{трс}} \cos \varphi . \quad (3.4)$$

Непосредственно опыт по определению коэффициента трения скольжения проводился в такой последовательности: образец семян помещался на площадку, наклоненную под углом на 5° больше угла φ_0 , что давало возможность пробе семян начать движение. На наклонной площадке отмечались метки № 1 и № 2 на расстоянии S друг от друга. При прохождении образцом метки № 1 включался секундомер, при прохождении метки № 2 секундомер выключался. Опыт проводился в трехкратной повторности для каждого образца. Полученные данные усреднялись, и рассчитывался коэффициент трения скольжения.

3.2.3.2. Методика обработки полученных экспериментальных данных

Математическое планирование эксперимента предусматривает определение рационального числа опытов, которые необходимо провести по заранее составленной схеме, с целью изучения влияния факторов на выбранный параметр оптимизации. Данный метод позволяет определить оптимальные параметры объекта исследований при условии взаимодействия факторов при меньшем числе опытов [146, с. 14–19].

Главной задачей математического планирования эксперимента является получение статистической математической модели объекта исследований в виде полинома (уравнения) первой или второй степени.

Общий ход построения и последующего использования математической модели исследуемого объекта сводится к следующему [147, с.79–92]:

- а) производится предварительное изучение объекта;
- б) выбирается параметр оптимизации (может быть несколько параметров оптимизации при реализации одного эксперимента), выявляются факторы, оказывающие наибольшее влияние, и по результатам проведения опытов строится модель;
- в) производится оценка адекватности полученной математической модели и ее интерпретация, т. е. распознавание ее геометрического образа;

г) модель используется в ходе оптимизации параметров исследуемого объекта.

Последовательность проведения опытов определялась матрицей планирования ортогонального центрального композиционного эксперимента второго порядка для двух факторов. Обработка полученных экспериментальных данных производилась по известным формулам математической статистики. Для получения математической модели использовался метод планирования эксперимента [146, с. 40–69; 148, с. 75–149; 150, с. 233–241; 151, с. 189–197].

Для получения представления о функции отклика при воздействии ряда факторов определялась следующая функция:

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n), \quad (3.5)$$

где η – критерий оптимизации, по которому оценивается изучаемый процесс или явление; $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n$ – независимые переменные (факторы), которыми можно варьировать.

Затем строился геометрический образ функции отклика в виде поверхности отклика в факторном пространстве. Функцию отклика можно аппроксимировать полиномом вида

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i>1}^n \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (3.6)$$

где $\beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$ – теоретические коэффициенты регрессии, по которым можно судить о степени влияния соответствующих факторов.

В результате проведения эксперимента получены коэффициенты регрессии b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} , которые являются оценками теоретических коэффициентов.

После этого уравнение приняло вид

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i>1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (3.7)$$

где \hat{y} – расчетное значение параметра оптимизации.

Таким образом, целью эксперимента являлось определение числовых значений коэффициентов уравнений регрессии. Использовался

ортогональный план эксперимента, в котором для любых двух столбцов матрицы выполнялось условие (3.8). Так как матрица системы уравнений является диагональной, то коэффициенты уравнения регрессии определялись согласно следующим выражениям:

$$\sum_{i=1}^k x_{ui}x_{uj} = 0, \quad (3.8)$$

$$b_i = \sum_{u=1}^k x_{ui} \bar{y}_u / \sum_{u=1}^k x_{ui}^2, \quad (3.9)$$

$$b_0 = b'_0 - \bar{x}_i^2 \sum_{i=1}^n b_{ii}, \quad (3.10)$$

где k – количество опытов; i – номер строки расширенной матрицы

планирования; $\bar{y}_u = \frac{\sum_{j=1}^m y_{uj}}{m}$ – среднее арифметическое результатов

u -го опыта; b'_0 – оценка свободного члена квадратичного регрессионного уравнения (3.6), вычисленная для столбца с фиктивной переменной композиционного плана.

Построчные выборочные дисперсии (ошибка опыта) рассчитывались по результатам параллельных опытов по выражению

$$S^2 \{y_u\} = \frac{\sum_{j=1}^m (y_{uj} + \bar{y}_u)^2}{m-1}, \quad (3.11)$$

где \bar{y}_u – среднее арифметическое значение выходного параметра для одного опыта при m повторностях; m – повторность опытов.

Проверка воспроизводимости эксперимента – это первая предпосылка регрессионного анализа о постоянстве дисперсии шума, которая оценивалась с помощью критерия Кохрена по выражению:

$$G = \frac{S^2 \{y_u\}_{\max}}{\sum_{u=1}^m S^2 \{y_u\}} \leq G(\alpha, f_k, k), \quad (3.12)$$

где $G(\alpha, f_k, k)$ – табличное значение критерия Кохрена для уровня значимости α , числа степеней свободы числителя $f_1 = m - 1$ и знаменателя $f_2 = k$.

При выполнении условия воспроизводимости эксперимента можно сделать вывод о незначительном расхождении в построчных выборочных дисперсиях. Это дает возможность, усреднив их, вычислить дисперсию воспроизводимости опытов:

$$S^2\{y\} = \frac{\sum_{u=1}^k S^2\{y_u\}}{k}. \quad (3.13)$$

Число степеней свободы $f_b = k(m - 1)$.

Значимость коэффициентов уравнения проверяли по t -критерию Стьюдента, согласно формуле оценки доверительного интервала:

$$\Delta b = \frac{t S^2\{y\}}{\sqrt{k}}. \quad (3.14)$$

Коэффициент уравнения регрессии статистически значим, если выполняется условие:

$$|b_j| > \Delta b = t_{(\alpha, f_b)} S\{b_j\}, \quad (3.15)$$

где $t_{(\alpha, f_b)}$ табличное значение t -критерия Стьюдента при уровне значимости α и числе степеней свободы f_b .

Проверка гипотезы об адекватности полученной математической модели экспериментальным данным проводилась по F -критерию Фишера и определялась из соотношения

$$F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2\{y\}}. \quad (3.16)$$

Дисперсия адекватности, после исключения незначимых коэффициентов уравнения, определялась следующим выражением:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{m}{k - c} \sum (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2, \quad (3.17)$$

где c – количество значимых коэффициентов уравнения регрессии.

Число степеней свободы $f_{ад} = k - c$.

Уравнение регрессии адекватно экспериментальным данным при выполнении условия

$$F \leq F(\alpha, f_{ад}, f_{в}). \quad (3.18)$$

Величину доверительного интервала для графических зависимостей, полученных по результатам обработки данных, определяли по выражению [152, с. 44]

$$\Delta x = \frac{t_{\alpha f} S_c}{\sqrt{n}}, \quad (3.19)$$

где $t_{\alpha f}$ – t -критерий Стьюдента (выбирается по таблице [152, с. 159] в зависимости от доверительной вероятности α и числа степеней свободы $f = n - 1$); S_c – статистическое среднее квадратичное отклонение; n – число измерений.

Методика обработки экспериментальных данных, связанных с неравномерностью распределения посевного материала по сошникам, предусматривала вычисление:

– среднего значения исследуемого параметра:

$$x_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} x_i}{n_c}, \quad (3.20)$$

где $x_{ср}$ – среднее значение массы посевного материала по семяпроводам, г; n_c – количество семяпроводов, шт.; i – номер семяпровода;

– среднего квадратичного отклонения:

$$S_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_c} (x_i - x_{ср})^2}{n_c - 1}}; \quad (3.21)$$

– коэффициента вариации

$$v = \frac{S_M}{x_{ср}}. \quad (3.22)$$

Для контроля и сравнения результатов аналогичные опыты проводились для сеялки СПШ-9, на которой были установлены серийные распределители. При этом норма высева устанавливалась исходя из средней хозяйственной нормы высева для условий Республики Беларусь и составляла: для семян пшеницы – 210 кг/га, семян ячменя – 222, семян ржи – 235, для гороха – 251 кг/га.

Помимо определения коэффициента вариации, проводилась статистическая оценка значимости различия неравномерности высева между сошниками сеялкой СПШ-9 и сеялкой С-9 с экспериментальным распределителем. При сравнении средних величин двух сопряженных выборок дается оценка существенности разности по t -критерию Стьюдента. Ошибку разности средних для сопряженных выборок вычисляют разностным методом. Порядок оценки существенности средней разности осуществляется по известной методике [153, с. 193, 194], согласно которой вычислялись для каждого варианта:

– среднее значение массы посевного материала по всем семяпроводам и повторностям

$$\bar{x} = \frac{\bar{x}_{\text{ср.1}} + \bar{x}_{\text{ср.2}} + \bar{x}_{\text{ср.3}}}{3}; \quad (3.23)$$

– сумма квадратов отклонений для каждого варианта по всем семяпроводам и повторностям

$$\sum (x_i - \bar{x})^2; \quad (3.24)$$

– абсолютная ошибка средней разности

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n(n-1)}}; \quad (3.25)$$

– относительная ошибка средней разности

$$S_{\bar{x}\text{отн}} = \frac{S_{\bar{x}} \cdot 100}{\bar{x}}; \quad (3.26)$$

– доверительный интервал генеральной средней при табличном значении степени свободы $t_{0,05; 214} = 1,96$, зависящей от числа сопряженных пар [153]:

$$\bar{x} \pm t_{05} \cdot S_{\bar{x}}; \quad (3.27)$$

– критерий существенности разности

$$t_{\text{ф.}} = \frac{\bar{x}}{S_{\bar{x}}}. \quad (3.28)$$

При этом, если фактическое значение $t_{\text{ф.}} > t_{0,05; 214}$, то тогда подтверждалась гипотеза значимости различия полученной разности средних значений распределения проб масс посевного материала экспериментальным и серийным распределителями.

3.3. Исследование конструктивных и технологических параметров пневматического высевающего аппарата горизонтального типа

Исследования проводились на двух экспериментальных установках, функционально взаимосвязанных между собой при изучении определенных показателей. Одна имитировала пневматическую систему высева группового дозирования посевного материала и была предназначена для исследования рабочего процесса питателя и распределителя. Вторая (бегущая дорожка) имитировала поступательное перемещение сошника по полю при определении в рядке продольной неравномерности распределения посевного материала.

3.3.1. Экспериментальные установки для исследования рабочего процесса питателя и распределителя посевного материала

Исследования проводились на экспериментальной установке (схема – на рис. 3.8, внешний вид – на рис. 3.9). Она состоит из электродвигателя 1 ($N = 11$ кВт, $n = 950$ об/мин), центробежного вентилятора высокого давления 2, обеспечивающего максимальное давление воздушного потока 5 кПа при частоте вращения 3850 с^{-1} , цилиндрического ресивера 3 диаметром 170 мм, бункера 6 с дозаторами 4 и 5 катушечного типа для семян и гранулированных минеральных удобрений, питателя эжекторного типа 7, пневмоматериалопровода 8 диаметром 50 мм и длиной 4 м, шестиканального распределителя посевного материала горизонтального типа 9, семя-

проводов 10 диаметром 32 мм, сборника семян 11. Привод дозаторов осуществляется от электродвигателя через девятиступенчатый редуктор цепной передачей. Установка нормы высева производится изменением частоты вращения и (или) длины рабочей части катушки. Установка работает следующим образом: вентилятор нагнетает воздух в пневмотранспортную магистраль. В ресивере давление воздуха выравнивается. Далее воздушный поток поступает в питатель эжекторного типа. Туда же из бункера дозаторами подается смесь из семян и удобрений (возможна раздельная подача). Воздушный поток в питателе захватывает смесь и далее по пневмоматериалопроводу транспортирует ее к шестиканальному распределителю, где происходит деление потока посевного материала по семяпроводам, а из них – в сборник семян.

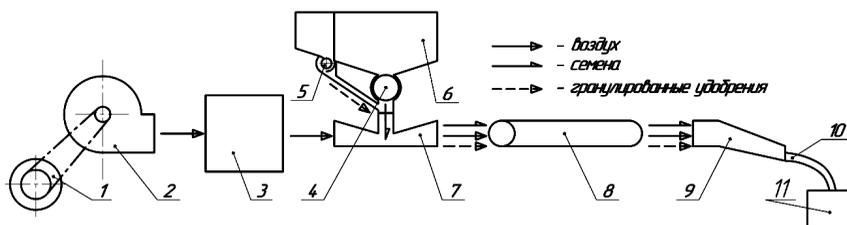
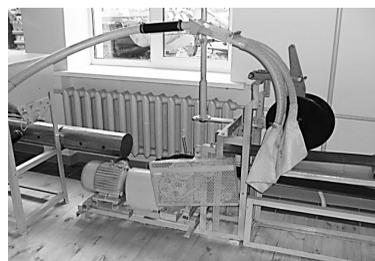


Рис. 3.8. Схема экспериментальной установки:

- 1 – электродвигатель; 2 – вентилятор; 3 – ресивер; 4 – дозатор зерна; 5 – дозатор гранулированных удобрений; 6 – бункер; 7 – питатель эжекторного типа; 8 – пневмоматериалопровод; 9 – распределитель потока посевного материала; 10 – семяпровод; 11 – сборник семян



а



б

Рис. 3.9. Внешний вид экспериментальной установки:

- а – общий вид экспериментальной установки; б – распределитель потока посевного материала со сборниками семян

Исследование продольной неравномерности распределения посевного материала выполнялось на экспериментальной установке (рис. 3.10 и 3.11). Установка состоит из двух основных узлов: ленточного транспортера 14 и приводной станции 12, жестко соединенных между собой. Транспортер (бегущая дорожка) состоит из рамы 1, натяжного 2 и приводного 5 барабанов, плоской ленты 3 и поддерживающих роликов 4. Приводная станция состоит из рамы 9, на которой смонтированы электродвигатель 11, червячный редуктор 10, распределитель посевного материала 8 с семяпроводом 7, двухдисковый сошник 6 и цепная передача 13.

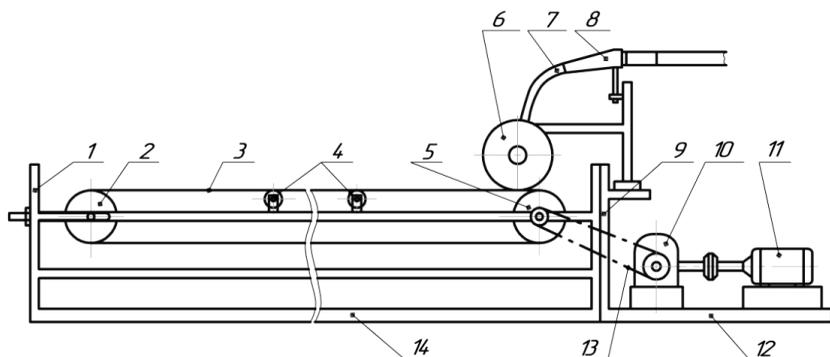


Рис. 3.10. Схема экспериментальной установки для определения продольной неравномерности:

- 1 – рама транспортера; 2 – натяжной барабан; 3 – лента;
 4 – поддерживающие ролики; 5 – приводной барабан; 6 – двухдисковый сошник; 7 – семяпровод; 8 – распределитель;
 9 – рама приводной станции; 10 – червячный редуктор; 11 – электродвигатель; 12 – приводная станция;
 13 – цепная передача; 14 – ленточный транспортер



Рис. 3.11. Экспериментальная установка для определения продольной неравномерности (общий вид)

Рабочий процесс на установке осуществляется следующим образом. Вращение от электродвигателя через цепную муфту, червячный редуктор и цепную передачу передается приводному валу барабана. Для изменения скорости перемещения транспортера предусмотрена возможность установки в цепной передаче сменных звездочек с различным числом зубьев, что позволяет имитировать различную поступательную скорость перемещения сошника (рабочую скорость посевной машины). Сошник крепится шарнирно, что позволяет копировать поверхность ленты и иметь постоянный контакт с дисками для их вращения. Диски притуплены, чтобы повысить вращающий момент и не повреждать ленту. Посевной материал поступает в сошник через один семяпровод, остальные соединены со сборником посевного материала.

3.3.2. Методика проведения лабораторных исследований

Для изучения рабочего процесса питателя эжекторного типа применительно к пневматическим системам высева группового дозирования зерновых сеялок разработаны экспериментальные образцы питателя, представленные на рис. 3.12. В соответствии с матрицей планирования экспериментальных исследований, питатель с определенными параметрами монтировался на дозаторе и соединялся с ресивером и пневмоматериалопроводом с распределителем.

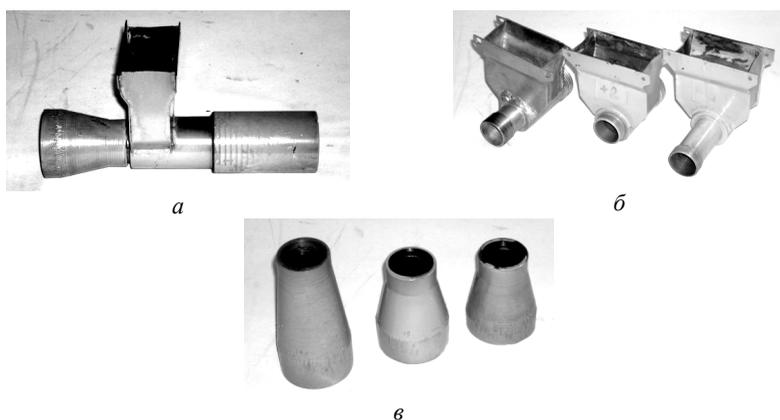


Рис. 3.12. Экспериментальные образцы питателя эжекторного типа:
а – питатель (общий вид); б – корпуса с приемной камерой; в – конфузоры

При определении максимальной производительности (пропускной способности) подача материала дозатором производилась с задержкой 30 с после включения вентилятора (для стабилизации воздушного потока в системе). Высев производился в течение 60 с, так как этого времени достаточно для заполнения пневмоматериалопровода посевным материалом по всей его длине. Изменение массовой подачи материала производилось варьированием длины рабочей части катушки и частоты ее вращения.

Максимальное значение производительности определялось по характеру перемещения материала в системе – начало образования завалов в трубопроводе и появление в горловине питателя частиц во взвешенном состоянии.

В процессе испытаний определялись параметры воздушного потока – статическое и динамическое давление в системе. Замер статического давления производился с помощью трубки Пито и *U*-образного водяного манометра, а динамического – с помощью трубки Пито и дифференциального манометра Testo-512 с трехкратной повторностью при установившемся режиме воздушного потока в течение 60 с.

Замер производился на входе в питатель и выходе из него в центральных точках поперечного сечения. Потери давления в питателе определялись как разность полных давлений на входе и выходе из питателя.

3.3.2.1. Определение поперечной неравномерности высева

Оценка поперечной неравномерности высева производилась на лабораторной установке, имитирующей пневматическую систему высева группового дозирования с экспериментальными элементами системы (питатель эжекторного типа, выравнивающее устройство распределителя потока посевного материала), для определения рациональных параметров выравнивающего устройства и определения влияния технологических параметров на неравномерность распределения посевного материала по сошникам.

Внешний вид выравнивающего устройства со сферическими отражательными поверхностями разного радиуса представлен на рис. 3.13. Поверхности устанавливались перед входом в конический направляющий распределителя.

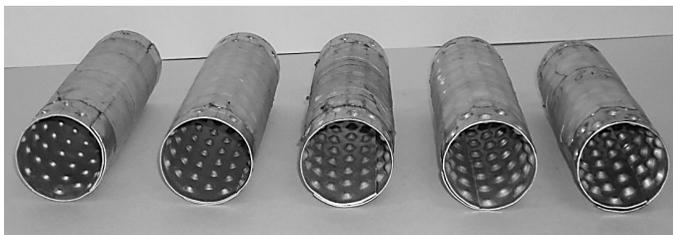


Рис. 3.13. Экспериментальные выравнивающие устройства

Во время опыта посевной материал (семена и удобрения) к питателю подавался дозаторами с желобчатой катушкой, откуда по пневмоматериалопроводу он транспортировался к распределителю. Для исследований использовались семена и удобрения стандартной посевной влажности. Катушечный дозатор обеспечивал производительность на зерновых культурах в диапазоне от 0,09 до 0,72 г/с (подача на один семяпровод составляла от 15 до 120 г/с), что соответствует норме высева от 30 до 450 кг/га, а удобрений – от 10 до 150 кг/га.

Подача материала выбиралась исходя из агротехнических норм высева на данную культуру с учетом скорости движения сеялки по полю 10 км/ч. Подача материала дозаторами производилась в течение 60 с через 30 с после пуска установки для стабилизации воздушного потока в системе. Для сбора семян и удобрений из каждого семяпровода применялись мешочки равных размеров из материала, свободно пропускающего воздух, для создания одинакового гидравлического сопротивления. Семяпроводы были равной длины. Повторность опытов принималась трехкратной исходя из 95%-й надежности показаний, как наиболее распространенной при технологических исследованиях. Исследования проводились при значениях атмосферного давления, влажности и температуры воздуха, равных или близких к стандартным. Посевной материал взвешивали на весах ВЭУ-6-1/2 (ТУ 25-7724-010–98) с точностью до 1 г (достаточной для лабораторных исследований). Опыты проводили в последовательности определенной матрицей планирования ротатбельного эксперимента второго порядка для четырех факторов. Обработка полученных экспериментальных данных производилась по известным формулам математической статистики. При этом определялись среднее арифметическое, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации.

3.3.2.2. Определение продольной неравномерности высева

Исследование распределения посевного материала вдоль рядка проводилось для определения неравномерности линейной и по площади. Исследование продольной неравномерности распределения посевного материала проводилось при совместной работе двух экспериментальных установок (имитирующей систему высева и «бегущей дорожки»). На ленту транспортера наносился слой консистентной смазки для фиксации высеваемого материала на поверхности ленты в месте падения. Скорость ленты транспортера и норма высева посевного материала устанавливались из учета движения сеялки по полю со скоростью 10 км/ч. Исследования проводились при высеве зерновых культур и смеси зерна с гранулированными фосфорными удобрениями в соотношении 3:1. Все опыты проводились в трехкратной повторности. Последовательность операций при проведении опытов была следующая. Устанавливалась требуемая норма высева, запускалась установка и осуществлялась подача в течение 30 с для заполнения системы посевным материалом. Затем включался привод транспортера и производился высев на липкую ленту длиной 2,5 м. При определении линейной неравномерности производились замеры расстояний между семенами или между семенами и гранулами удобрений при их совместном высеве. Полученные данные обрабатывались методами математической статистики. Определялись средний интервал, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации. По полученным статистическим данным с помощью прикладных статистических программ устанавливался закон распределения и проверялся по критерию согласия Кохрена. Для определения неравномерности распределения по площади на ленту накладывалась прозрачная линейка с нанесенными квадратами 5×5 см и подсчитывалось количество семян и гранул удобрений (в случае совместного высева), находящихся в этих квадратах. Полученные данные применяли для определения дискретного закона распределения посевного материала вдоль рядка по методике ВИСХОМ [154].

3.3.2.3. Проведение натурных испытаний

Для подтверждения теоретических предпосылок и проверки на адекватность расчетных результатов проводились сравнительные испытания экспериментальных образцов элементов системы высева

на натуральных образцах посевных машин на стационаре (стендовые испытания) и в производственных условиях (полевые испытания). Натурные испытания проводились на почвообрабатывающе-посевном агрегате АППА-6, разработанном РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». Агрегат имеет пневматическую высевальную систему группового дозирования с шестиканальными распределителями горизонтального типа. Дозаторы семян укомплектованы желобчатыми катушками, туковые – штифтовыми. Привод вентилятора осуществляется от гидросистемы трактора, частота вращения рабочего колеса вентилятора находится в пределах $3200...3400 \text{ мин}^{-1}$. При этом скорость воздушного потока составляет $20...25 \text{ м/с}$. Установка нормы высева зерна осуществляется изменением длины рабочей части катушки, а нормы внесения удобрений – изменением частоты вращения катушки с помощью блока сменных шестерен.

Стендовые испытания проводились по следующей схеме. Высев осуществлялся на $\frac{1}{2}$ рабочей ширины захвата сеялки, в нашем случае – 24 сошника. Навеска бралась из расчета посева $0,025 \text{ га}$. Зерно и удобрения из каждого семяпровода высевали в сборники и взвешивали на весах ВЛКТ-500 с точностью до $0,1 \text{ г}$ (повышение точности связано с меньшей массой навески). Затем производился разбор проб (для отделения семян от удобрений). Семена и удобрения взвешивались отдельно. По полученным данным определялись коэффициент вариации посевного материала дозаторами зерна и удобрений, коэффициент вариации распределения по сошникам и средний коэффициент вариации по распределителям. На основании этого определяли коэффициент вариации распределения посевного материала по сошникам по формуле (2.105), сравнивали расчетные и экспериментальные значения, и определяли их отклонение. Погрешность рассчитывали методами математической статистики [152].

Целью проведения полевого опыта являлось определение равномерности размещения растений по площади поля. Система высева была укомплектована экспериментальными образцами питателя эжекторного типа и выравнивающего устройства распределителя с оптимальными служебными характеристиками.

В качестве посевного материала использовались ячмень и люпин (как представители злаковых зерновых и среднесемянных зернобобовых культур) и гранулированный суперфосфат.

После полного появления всходов до начала кушения для зерновых размещение растений в рядках проверялось по диагонали участка с трехкратной повторностью. Методом рандомизации опытов выбирались три участка. На рядок накладывалась линейка длиной 2,5 м и производился замер расстояний между растениями с точностью ± 5 мм. Полученные данные обрабатывались методами математической статистики. Определялись средний интервал между растениями, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации. Затем проверяли закон распределения семян вдоль рядка с помощью прикладных статистических программ. На основании полученных данных строили графические зависимости и определяли количество растений в интервале от 1 до 6 см.

3.3.2.4. Методика определения энергопотребления

Известно [140], что мощность на привод вентилятора N_B для установок пневматического транспорта зависит от КПД привода $\eta_{пр}$, КПД вентилятора η_v и сопротивления пневмосети P_c . Вследствие того, что пневмоматериалопровод гибкий и схема его укладки на сеялках пространственно сложная, изменяющаяся в течение выполнения технологического процесса, теоретически с необходимой точностью определить сопротивление сети затруднительно.

Мощность на привод вентилятора определялась при работе установки, представленной на рис. 3.9. Поэтому затраты мощности на привод вентилятора определялись экспериментальным путем. Определялись значения фазных напряжений и тока в сети питания электродвигателя привода вентилятора при отсутствии посевного материала в пневмотранспортной сети и с посевным материалом при различной его концентрации. Замеры производились универсальным прибором K4570/2Ц (рис. 3.14) после установившегося теплового режима электродвигателя.



Рис. 3.14. Прибор K4570/2Ц для измерения силы тока и напряжения в сети

По фазным напряжению и току определялась потребляемая мощность:

$$N_{эв} = \frac{UI \cos \varphi \sqrt{3}}{1000}, \quad (3.29)$$

где U – напряжение в сети, В; I – сила тока в сети, А; $\cos \varphi$ – для данного двигателя равен 0,76.

По полученным данным строили графическую зависимость потребляемой мощности от сопротивления в сети (концентрации транспортируемого материала).

3.4. Анализ результатов экспериментальных исследований

3.4.1. Априорное ранжирование факторов процесса

Анализ работ [34, 71, 72, 73, 77, 82], посвященных пневматическому транспортированию сыпучих материалов, позволил выявить 14 факторов, способных оказать влияние на качество распределения посевного материала (неравномерность распределения).

В результате анкетного опроса специалистов в области посева сельскохозяйственных культур составлен алгоритм для определения коэффициента конкордации. В связи с тем, что при обработке анкетных данных были выявлены «связанные ранги», коэффициент конкордации [139, с. 13]

$$W = \frac{S_i}{\frac{1}{12} m_z^2 (n_z^3 - n_z) - m_z \sum_i T_i}, \quad (3.30)$$

где S_i – сумма квадратов отклонений; m_z – число опрашиваемых специалистов; n_z – число факторов; T_i – параметр, характеризующий связанные ранги факторов.

Параметр T_i определялся по следующей зависимости:

$$T_i = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{m_i} (t_j^3 - t_j), \quad (3.31)$$

где t_j – j -е число одинаковых рангов в i -м ранжировании.

Расчет коэффициента конкордации позволил оценить степень согласованности мнений опрошенных специалистов.

В нашем случае $W = 0,75$, что отлично от нуля.

Значимость коэффициента конкордации проверяли по критерию Пирсона χ^2 , который ввиду наличия «связанных рангов» определялся по формуле

$$\chi^2 = \frac{S_i}{\frac{1}{12} m_z n_z (n_z + 1) - \frac{1}{n_z - 1} \sum_{j=1}^{m_z} T_i} = \frac{4226}{\frac{1}{12} \cdot 5 \cdot 14 (14 + 1) - \frac{1}{14 - 1} \cdot 13,5} = 48,877.$$

Согласно [139, с. 106], для уровня значимости 5 % и числа степеней свободы $f = 13$ табличное значение критерия Пирсона

$$\chi_{\text{табл}}^2 = 22,36203 < \chi^2 = 48,877.$$

Вследствие того, что табличное значение критерия меньше расчетного, с вероятностью $\alpha_d = 0,95$ можно утверждать, что согласованность мнений специалистов относительно влияния факторов на показатель неравномерности распределения не является случайной и оценивается коэффициентом конкордации $W = 0,75$.

По результатам ранжирования построена априорная диаграмма рангов (рис. 3.15). Для этого по оси абсцисс отложены факторы в порядке возрастания их рангов, а по оси ординат – суммы рангов соответствующих факторов.

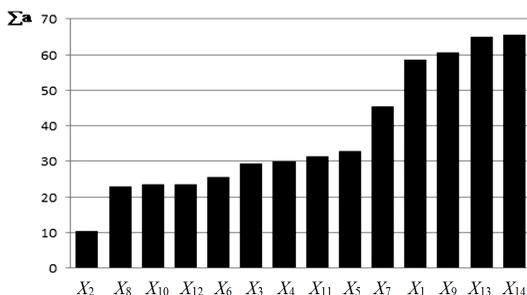


Рис. 3.15. Априорная диаграмма рангов

В результате анализа диаграммы рангов из числа факторов, оказывающих наибольшее влияние на качество распределения семян

по сошникам, были исключены переменные X_2 (длина пневмоматериалапровода), X_3 (норма высева), X_4 (коэффициент трения), X_5 (влажность семян), X_6 (угол наклона распределителя от вертикали), X_7 (высота распределителя), X_8 (диаметр пневмоматериалопровода), X_{10} (количество семяпроводов), X_{11} (длина семяпроводов), X_{14} (радиус кривизны отвода распределителя).

Анализ наиболее значимых факторов, влияющих на параметр оптимизации, позволил сделать определенные выводы. Скорость воздушного потока w_v (фактор X_1) для устойчивого транспортирования посевного материала в пневматической централизованной системе высева должна находиться в пределах от 17 до 28 м/с, что подтверждают и другие специалисты [40, 41].

Равномерное распределение материаловоздушного потока достигается путем установки в распределительном устройстве конусного направителя (фактор X_9) в совокупности с турбулизирующей вставкой конфузorno-диффузорной формы, основными параметрами которой являются угол сужения конфузора (фактор X_{12}) и выходной диаметр конфузора (фактор X_{13}). В процессе пневмотранспорта в турбулизирующей вставке происходит поперечное сжатие двухкомпонентного материаловоздушного потока и приближение его к оси распределителя. На выходе из вставки ввиду конструктивных особенностей происходит формирование однородной материаловоздушной смеси по всему поперечному сечению вертикальной колонны. Для равномерного распределения по семяпроводам на входе в распределительную головку поток должен стабилизироваться. Данное требование выполняется на расстоянии между вставкой и распределительной головкой не менее четырех диаметров вертикальной колонны. Все это исключает негативное влияние наклона вертикальной колонны на равномерность распределения семян по сошникам. Таким образом, в результате представленного анализа наиболее значимыми факторами, влияющими на процесс распределение семян по сошникам, являются угол сужения конфузора (фактор X_{12}) и выходной диаметр конфузора (фактор X_{13}).

3.4.2. Определение свойств посевного материала

Физико-механические свойства посевного материала оказывают значительное влияние на характер протекания процесса пневматического транспортирования [155, с. 25, 26]. Поэтому перед началом проведения экспериментальных исследований определялись наиболее

характерные из них для семян пшеницы, ржи, ячменя, сои, люпина. При этом использовались только семена посевных кондиций. На основании полученных данных определялись справочные значения скорости витания.

Результаты исследований основных физико-механических свойств семян, изучение которых было предусмотрено программой экспериментальных исследований, сведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Физико-механические свойства семян

| Наименование показателя | Значение показателя для культур | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | Пшеница | Рожь | Ячмень | Соя | Люпин |
| Эквивалентный диаметр, мм | 3,8 | 3,6 | 4,0 | 6,1 | 6,7 |
| Масса 1000 семян, г | 38,3 | 37,3 | 39,1 | 198,5 | 205,7 |
| Влажность семян, % | 13,4 | 14,1 | 14,5 | 13,7 | 15,0 |
| Объемная масса, кг/м ³ | 735 | 730 | 710 | 750 | 760 |
| Плотность, кг/м ³ | 1360 | 1375 | 1360 | 1320 | 1390 |
| Коэффициент трения скольжения (сталь) | 0,4 | 0,41 | 0,43 | 0,3 | 0,4 |
| Скорость витания, м/с | 8,4...11,1 | 8,3...10,1 | 8,4...10,8 | 8,1...15,3 | 8,2...16,1 |

Анализ проведенных исследований показал, что физико-механические свойства культур, в значительной степени влияющие на технологический процесс пневматического транспортирования и дальнейшее распределение, отличаются между собой. В связи с этим в исследованиях предполагалось использование всех предложенных культур. Поскольку физико-механические свойства семян тритикале несущественно отличаются от аналогичных параметров ржи, полученные результаты могут быть использованы на высеве тритикале.

Влажность посевного материала (семян и суперфосфата) определялась влагомером МГ-4, объемная масса – объемным и весовым методом, геометрические параметры – штангенциркулем ШЦ-I-125-0,05 (ГОСТ 166–89). Гранулометрический состав суперфосфата определялся ситовым анализом по ГОСТ 21560.1–82. На основании полученных данных определялись справочные значения скорости витания. Все результаты представлены в табл. 3.2 и 3.3.

Таблица 3.2

Физико-механические и аэродинамические свойства семян

| Наименование показателя | Значение показателей для культур | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|------------|------------|
| | Рожь озимая | Ячмень | Люпин |
| Влажность, % | 14,1 | 14,2 | 15,0 |
| Объемная масса, кг/м ³ | 734 | 708 | 760 |
| Плотность, кг/м ³ | 1375 | 1360 | 1390 |
| Масса 1000 семян, г | 36,4 | 36,8 | 202,5 |
| Эквивалентный диаметр, мм | 3,5 | 4,0 | 6,7 |
| Скорость витания, м/с | 8,3...10,1 | 8,4...10,8 | 8,2...16,1 |

Таблица 3.3

Физико-механические и аэродинамические свойства
гранулированного суперфосфата

| Показатель | Значение |
|------------------------------|----------|
| Влажность, % | 2,5 |
| Плотность, кг/м ³ | 990 |
| Скорость витания, м/с | 8,6 |
| Фракционный состав, %: | |
| менее 1 мм | 0,2 |
| от 1 до 2 мм | 51,3 |
| от 2 до 3 мм | 46,5 |
| от 3 до 5 мм | 2 |
| более 5 мм | – |

3.4.3. Определение поперечной неравномерности высева

Исследованию распределителей потока посевного материала при высева различных культур в нашей стране посвящены работы ученых Белорусской ГСХА А. В. Клочкова [22], В. С. Астахова [34], А. С. Сентюрова [78], Г. Н. Лысевского [95]. В данных работах представлено в основном обоснование конструктивных параметров распределителей горизонтального типа. Они не рассматривали наиболее распространенные в настоящее время распределители вертикального типа. Соответственно, недостаточно изучено и влияние неравномерности распределения семян по сечению вертикальной колонны данных распределителей.

Одним из наиболее распространенных способов повышения равномерности распределения (в данном случае – на практике) является дополнительная турбулизация поступающей к распределительной головке материало-воздушной смеси. Дополнительная турбулизация осуществляется посредством различных по конструкции элементов, устанавливаемых на вертикальном участке подводящего трубопровода. Это способствует выравниванию концентрации частиц высеваемого материала по поперечному сечению трубопровода.

В связи с этим для улучшения качества работы пневматической системы высева (снижения неравномерности распределения по семяпроводам) был разработан комбинированный вертикальный распределитель, который выполнен в виде турбулизирующей вставки конфузорно-диффузорной формы и конусного направителя (рис. 3.16). Принцип работы устройства заключается в следующем. Посевной материал, транспортируемый воздушным потоком к распределительной головке, проходит отвод, где под действием инерционных сил концентрируется у поверхности с большим радиусом кривизны. Далее посевной материал поступает в вертикальную колонну, где установлена турбулизирующая вставка. На каждом из этих участков характер течения потока материало-воздушной смеси различный, определяемый, в основном, конструктивными особенностями элементов устройства и аэродинамическими параметрами транспортируемого материала.

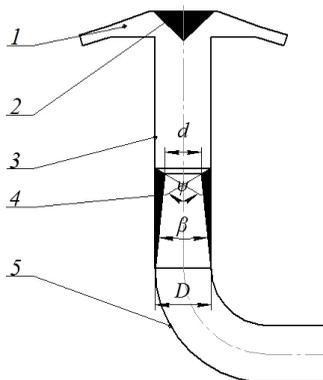


Рис. 3.16. Схема разработанного распределителя:
 1 – распределительная головка; 2 – направитель; 3 – вертикальная колонна;
 4 – турбулизирующая вставка; 5 – отвод

Расчет проводился с переменными углами конфузора, обеспечивающими минимальное аэродинамическое сопротивление. При этом поисковыми исследованиями установлено, что наиболее значимыми факторами, влияющими на процесс работы распределителя, являются сужение конфузора (угол β) и диаметр выходного сечения конфузора (d). Однако при выполнении расчетов практически невозможно учесть совместное влияние всех менее значимых факторов, поэтому была проведена экспериментальная проверка на адекватность результатов теоретического расчета.

Постоянными параметрами были приняты следующие факторы: угол расширения диффузора $\psi = 90^\circ$; диаметр конфузора на входе выбирался из конструктивных параметров распределителя $D = 140$ мм. Переменными факторами были угол сужения конфузора β и диаметр конфузора на выходе d . Исследования проводились при высеве семян зерновых и зернобобовых культур. В процессе испытаний определялись параметры воздушного потока: средняя скорость и динамическое давление в системе, а также коэффициент вариации распределения посевного материала по семяпроводам v , %. Для сокращения количества опытов применялся ортогональный центральный композиционный план второго порядка для двух факторов. Факторы и уровни их варьирования представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Уровни варьирования факторов

| Варьируемые параметры | β | d |
|--------------------------------|---------|-------|
| Единицы измерения | град. | мм |
| Кодовые обозначения факторов | x_1 | x_2 |
| Основной уровень ($x_i = 0$) | 14 | 90 |
| Интервал варьирования | 6 | 10 |
| Нижний уровень ($x_i = -1$) | 8 | 80 |
| Верхний уровень ($x_i = +1$) | 20 | 100 |

Для параметра оптимизации проведены 9 вариантов опыта. Значения факторов на нулевом уровне выбирались по результатам поисковых исследований. Кодирование уровней факторов осуществлялось по формуле [147]

$$x_i = \frac{C_i - C_{0i}}{\varepsilon}, \quad (3.32)$$

где x_i – кодированное значение уровня фактора; C_i и C_{0i} – натуральные значения фактора (соответственно, его текущее значение и значение на нулевом уровне); ε – натуральное значение интервала варьирования фактора.

$$\varepsilon = \frac{C_i^B - C_i^H}{2}, \quad (3.33)$$

где C_i^B и C_i^H – значение фактора, соответственно, на верхнем и нижнем уровнях.

Все эксперименты проводились в трехкратной повторности. Полученные результаты усреднялись и округлялись. С целью исключения влияния систематических ошибок, вызванных внешними неконтролируемыми факторами, в ходе экспериментальных исследований выполнялась рандомизация опытов, под которой понимается чередование отдельных опытов в случайном порядке. Это позволило сравнивать результаты подобных опытов вследствие усреднения влияния эффектов неконтролируемых факторов. Процедура рандомизации опытов выполнялась с помощью таблиц случайных чисел [148], при этом, последовательно по столбцам таблицы, были выбраны числа, соответствующие порядковым номерам проводимых опытов. Матрица ортогонального центрального композиционного плана второго порядка для двух факторов приведена в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Матрица планирования

| Номер опыта | Уровни факторов | | |
|-------------|-----------------|-------|-------|
| | x_0 | x_1 | x_2 |
| 1 | 1 | -1 | -1 |
| 2 | 1 | 1 | -1 |
| 3 | 1 | -1 | 1 |
| 4 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 1 | -1 | 0 |

| Номер опыта | Уровни факторов | | |
|-------------|-----------------|-------|-------|
| | x_0 | x_1 | x_2 |
| 6 | 1 | 1 | 0 |
| 7 | 1 | 0 | -1 |
| 8 | 1 | 0 | 1 |
| 9 | 1 | 0 | 0 |

С помощью критерия Кохрена выполнялась проверка гипотезы об однородности дисперсий по выражению (3.12). Табличное значение критерия Кохрена выбиралось по таблице [152, с. 159, прилож. 2] и для чисел степеней свободы $f_1 = 2$ и $f_2 = 9$ $G(\alpha, f_k, k) = 0,478$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Расчетные значения критерия Кохрена представлены в табл. 3.6, анализ данных которой показывает, что условие (3.12) выполняется для каждого значения параметра оптимизации.

Таблица 3.6

Результаты оценки воспроизводимости опытов по критерию Кохрена

| Наименование культуры | Значение критерия | |
|-----------------------|-------------------|-----------|
| | расчетное | табличное |
| Ячмень | 0,342 | 0,478 |
| Рожь | 0,477 | 0,478 |
| Пшеница | 0,225 | 0,478 |
| Люпин | 0,464 | 0,478 |
| Соя | 0,410 | 0,478 |

Следовательно, гипотеза об однородности построчных выборочных дисперсий не противоречит экспериментальным данным, что позволяет вычислить дисперсию воспроизводимости опытов по выражению (3.13).

Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Коэффициенты уравнения регрессии

| Коэффициенты уравнения регрессии квадратичной модели | Значение коэффициентов для культур | | | | |
|--|------------------------------------|-------|---------|-------|-------|
| | Ячмень | Рожь | Пшеница | Люпин | Соя |
| l | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| b_0 | 4,08 | 1,18 | 3,13 | 4,44 | 3,13 |
| b_1 | -0,55 | -1,84 | -0,52 | 0,08 | -0,25 |

| Коэффициенты уравнения регрессии квадратичной модели | Значение коэффициентов для культур | | | | |
|--|------------------------------------|------|---------|-------|-------|
| | Ячмень | Рожь | Пшеница | Люпин | Соя |
| b_2 | 0,73 | 1,24 | 1,29 | 0,77 | 0,58 |
| $b_1 \cdot b_2$ | 0,42 | 0,99 | 0,36 | -0,14 | 0,45 |
| b_1^2 | 0,47 | 1,75 | 0,94 | -0,79 | -0,32 |
| b_2^2 | 0,68 | 2,53 | 0,84 | 0,37 | 1,56 |

В итоге регрессионные уравнения второго порядка для параметра оптимизации каждой культуры принимают следующий вид:

для ячменя:

$$Y_1 = 4,08 - 0,55 \cdot x_1 + 0,73 \cdot x_2 + 0,42 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,47 \cdot x_1^2 + 0,68 \cdot x_2^2; \quad (3.34)$$

для ржи:

$$Y_2 = 1,18 - 1,84 \cdot x_1 + 1,24 \cdot x_2 + 0,99 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,75 \cdot x_1^2 + 2,53 \cdot x_2^2; \quad (3.35)$$

для пшеницы:

$$Y_3 = 3,13 - 0,52 \cdot x_1 + 1,29 \cdot x_2 + 0,36 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,94 \cdot x_1^2 + 0,84 \cdot x_2^2; \quad (3.36)$$

для люпина:

$$Y_4 = 4,44 - 0,08 \cdot x_1 + 0,77 \cdot x_2 + 0,14 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,79 \cdot x_1^2 + 0,37 \cdot x_2^2; \quad (3.37)$$

для сои:

$$Y_5 = 3,13 - 0,25 \cdot x_1 + 0,58 \cdot x_2 + 0,45 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,32 \cdot x_1^2 + 1,56 \cdot x_2^2. \quad (3.38)$$

Следующий этап обработки экспериментальных данных заключался в определении значимости полученных коэффициентов в уравнениях регрессии. Значимость коэффициентов уравнений проверялась по t -критерию Стьюдента согласно формуле определения доверительного интервала (3.14). Затем определялись доверительные интервалы соответствующих коэффициентов. Табличное значение t -критерия Стьюдента $t_{(\alpha, f_b)}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f_b = 18$ равно 2,1 [152]. Согласно условию (3.15) все коэффициенты уравнений регрессии являются значимыми.

Адекватность уравнений регрессии (3.34)–(3.38) экспериментальным данным проверялась по F -критерию Фишера. Табличные значения критерия Фишера выбирались по таблице [152, с. 160, прилож. 3] для чисел степеней свободы f_v и $f_{ад}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Расчетные и табличные значения критерия Фишера представлены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Оценка адекватности уравнений регрессии по расчетным значениям критерия Фишера

| Параметр оптимизации Y по культурам | Культура | | | | |
|---|----------|------|---------|-------|------|
| | Ячмень | Рожь | Пшеница | Люпин | Соя |
| Расчетное значение критерия Фишера F | 1,93 | 2,99 | 1,19 | 2,09 | 0,36 |
| Табличное значение критерия Фишера $F(\alpha, f_{ад}, f_v)$ | 3,16 | 3,16 | 3,16 | 3,16 | 3,16 |

Так как расчетные значения критерия Фишера не превышают табличные, следовательно, полученные уравнения адекватно описывают экспериментальные данные. Заключительным этапом математической обработки экспериментальных данных являлось определение оптимальной области значений исследуемых факторов на основании анализа поверхностей отклика, полученных методом двумерных сечений. Поверхности отклика, построенные по уравнениям регрессии, представлены на рис. 3.17–3.22.

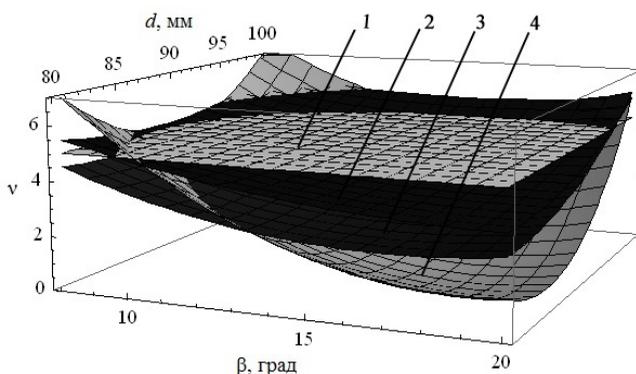


Рис. 3.17. Диаграмма поверхности отклика (зерновые культуры) $v_3 = f(\beta, d)$:
1 – показательная поверхность; 2 – ячмень; 3 – пшеница; 4 – рожь

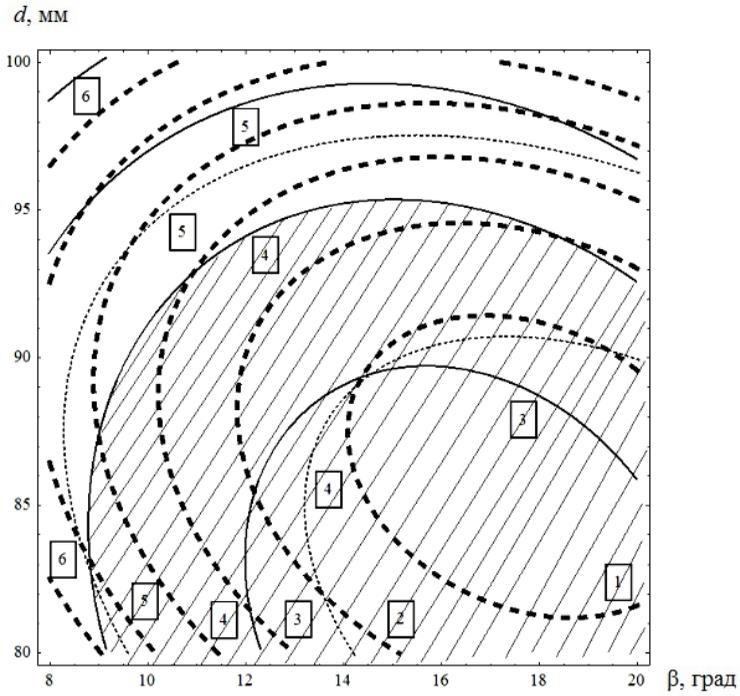


Рис. 3.18. Наложение двумерных сечений поверхностей отклика (зерновые культуры) $v_3 = f(\beta, d)$

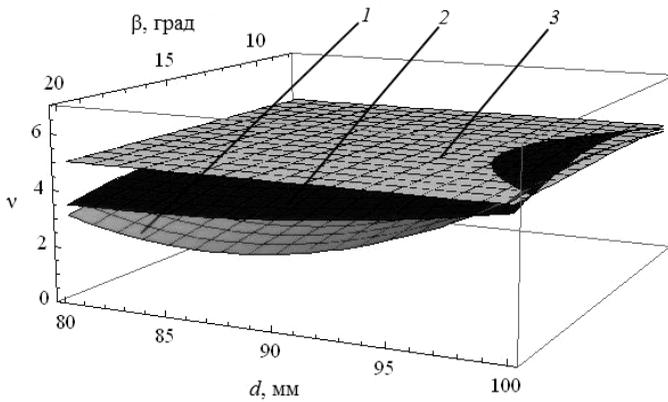


Рис. 3.19. Диаграмма поверхности отклика (зернобобовые культуры) $v_{36} = f(\beta, d)$:
1 – соя; 2 – люпин; 3 – показательная поверхность

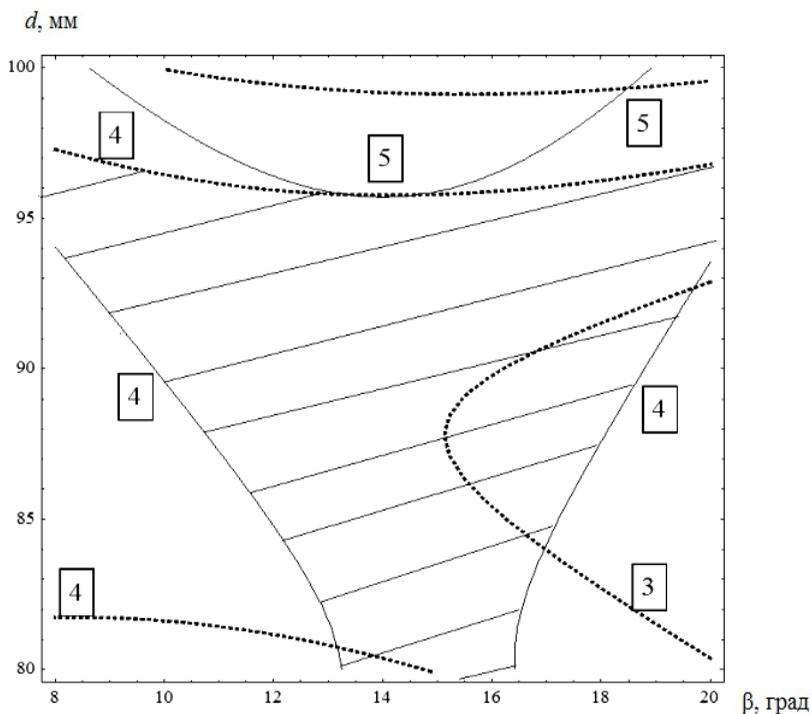


Рис. 3.20. Наложение двухмерных сечений поверхностей отклика (зернобобовые культуры) $v_{36} = f(\beta, d)$

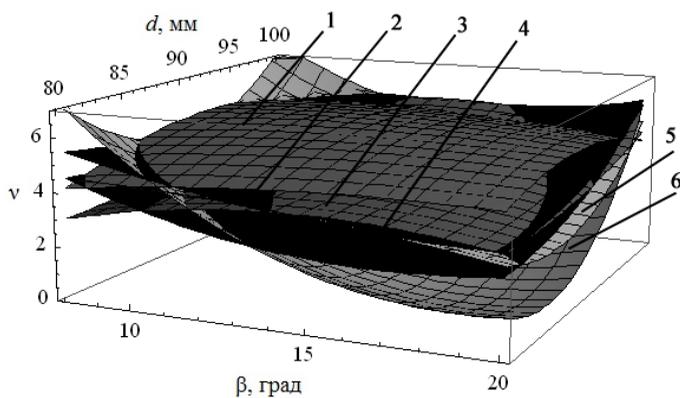


Рис. 3.21. Диаграмма поверхности отклика (все культуры) $v_{\text{общ}} = f(\beta, d)$:
1 – рапс; 2 – люпин; 3 – соя; 4 – рожь; 5 – пшеница; 6 – ячмень

С целью определения оптимальных параметров вертикального распределителя, удовлетворяющих параметру оптимизации, полученные двухмерные сечения параметров отклика соединили воедино методом наложения (рис. 3.22).

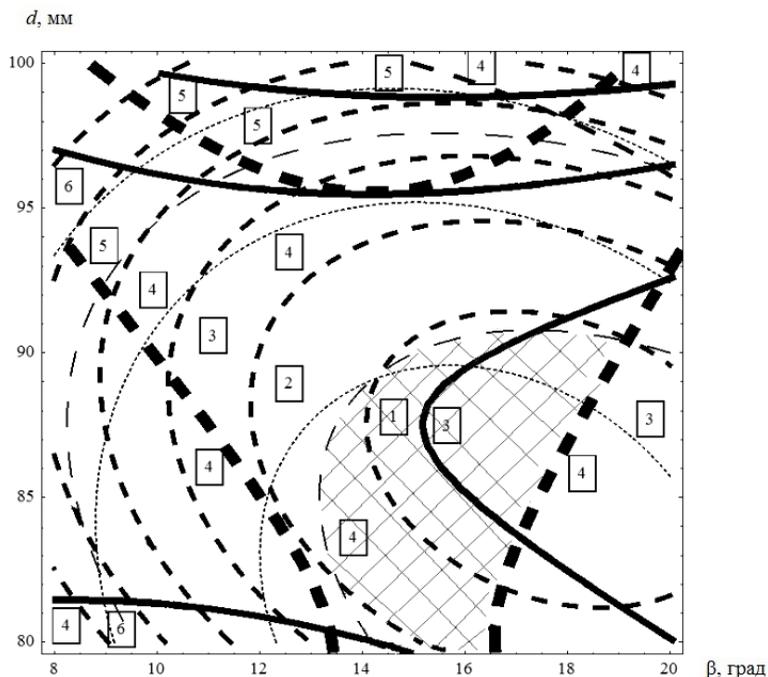


Рис. 3.22. Наложение двухмерных сечений поверхностей отклика (все культуры) $v_{\text{общ}} = f(\beta, d)$

Из анализа данной графической зависимости следует, что область оптимума для данных факторов находится в пределах, соответствующих теоретически определенным рациональным значениям (табл. 3.9).

Таблица 3.9

Оптимальные параметры факторов

| Факторы | Область оптимума |
|--|------------------|
| Угол сужения конфузора β , град. | 14...17 |
| Выходной диаметр конфузора d , мм | 81...91 |

Таким образом, экспериментально подтверждены теоретические предпосылки и определены оптимальные области значений основных факторов, оказывающих существенное влияние на эксплуатационные свойства распределителя вертикального типа.

3.4.4. Натурные испытания пневматической системы высева с комбинированным распределительным устройством вертикального типа

В процессе натурных испытаний, проходивших в ГУ «Белорусская МИС», проводилась сравнительная оценка качественных показателей (неравномерности распределения частиц посевного материала по сошникам) работы высевающих систем зерновой сеялки С-9 и ее аналога СПШ-9. Сеялка С-9 была оснащена экспериментальным распределителем; на сеялке СПШ-9 распределитель был серийный.

В соответствии с теоретическими исследованиями и проведенными лабораторными экспериментами на сеялке С-9 был установлен вертикальный распределитель со следующими оптимальными конструктивными параметрами: угол сужения β конфузора составил 15° , выходной диаметр d конфузора – 88 мм, высота конфузора H_k – 198 мм, угол расширения ψ диффузора – 90° , высота диффузора H_d – 26 мм, входной диаметр D конфузора – 140 мм исходя из конструктивных соображений. Угол при вершине направителя α составил 40° , а его высота H_n – 192 мм.

Результаты обработки полученных данных для семян пшеницы, высеянных сеялкой С-9 с экспериментальным распределителем и сеялкой СПШ-9 с серийным распределителем, представлены в табл. 3.10. Таким образом, среднее значение коэффициента вариации для экспериментального распределителя (С-9) составило 3,9, что соответствует установленным агротехническим требованиям по неравномерности распределения частиц посевного материала по сошникам. В свою очередь, среднее значение коэффициента вариации для серийного распределителя (СПШ-9) составило 14,0, что значительно превышает значения, установленные агротехническими требованиями по неравномерности распределения частиц посевного материала по семяпроводам.

Таблица 3.10

Результаты измерения неравномерности распределения при высеве семян пшеницы экспериментальным и серийным распределителями

| Номер семяпровода | Масса проб (сеялка С-9), г | | | Масса проб (сеялка СПШ-9), г | | |
|-------------------|-------------------------------|-----|-----|---------------------------------|-----|-----|
| | Повторности | | | Повторности | | |
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| <i>l</i> | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 360 | 352 | 348 | 360 | 253 | 378 |
| 2 | 354 | 345 | 345 | 280 | 395 | 296 |
| 3 | 341 | 351 | 346 | 254 | 301 | 275 |
| 4 | 361 | 352 | 359 | 256 | 382 | 399 |
| 5 | 369 | 336 | 340 | 217 | 396 | 290 |
| 6 | 354 | 354 | 347 | 382 | 354 | 377 |
| 7 | 345 | 343 | 338 | 345 | 303 | 338 |
| 8 | 330 | 356 | 331 | 330 | 366 | 291 |
| 9 | 344 | 359 | 344 | 344 | 289 | 344 |
| 10 | 337 | 341 | 335 | 337 | 341 | 335 |
| 11 | 342 | 355 | 358 | 342 | 355 | 358 |
| 12 | 331 | 352 | 348 | 391 | 280 | 288 |
| 13 | 352 | 353 | 328 | 322 | 393 | 389 |
| 14 | 362 | 366 | 328 | 322 | 326 | 321 |
| 15 | 346 | 343 | 339 | 326 | 343 | 342 |
| 16 | 359 | 346 | 321 | 319 | 326 | 398 |
| 17 | 332 | 338 | 342 | 332 | 338 | 255 |
| 18 | 352 | 350 | 328 | 325 | 380 | 267 |
| 19 | 327 | 352 | 325 | 327 | 382 | 396 |
| 20 | 343 | 357 | 347 | 283 | 397 | 285 |
| 21 | 332 | 367 | 356 | 392 | 387 | 276 |
| 22 | 365 | 370 | 355 | 386 | 380 | 382 |
| 23 | 359 | 331 | 326 | 399 | 301 | 340 |
| 24 | 360 | 359 | 332 | 302 | 279 | 278 |
| 25 | 367 | 335 | 340 | 287 | 305 | 399 |
| 26 | 376 | 351 | 338 | 396 | 301 | 282 |
| 27 | 379 | 363 | 366 | 279 | 393 | 391 |
| 28 | 355 | 359 | 362 | 280 | 379 | 382 |
| 29 | 365 | 396 | 351 | 395 | 396 | 385 |

| <i>l</i> | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 30 | 370 | 353 | 342 | 390 | 343 | 397 |
| 31 | 345 | 343 | 345 | 305 | 283 | 337 |
| 32 | 351 | 394 | 337 | 391 | 284 | 270 |
| 33 | 359 | 367 | 367 | 309 | 327 | 385 |
| 34 | 364 | 372 | 351 | 294 | 295 | 382 |
| 35 | 358 | 362 | 375 | 388 | 280 | 339 |
| 36 | 351 | 364 | 374 | 394 | 262 | 397 |
| $x_{\text{ср}}$ (среднее значение параметра) | 352,69 | 355,2 | 344,8 | 335,86 | 335,97 | 337,75 |
| S_M (среднее квадратическое отклонение) | 1212,1 | 1317 | 1319,8 | 4668,5 | 4549,1 | 4964,9 |
| v (коэффициент вариации) | 3,77 | 3,96 | 3,97 | 13,89 | 13,54 | 14,7 |
| $v_{\text{ср}}$ (среднее значение коэффициента вариации) | 3,9 | | | 14,0 | | |

Для наглядного подтверждения выводов на основании данных табл. 3.8 построили эпюру распределения посевного материала по семяпроводам (рис. 3.23).

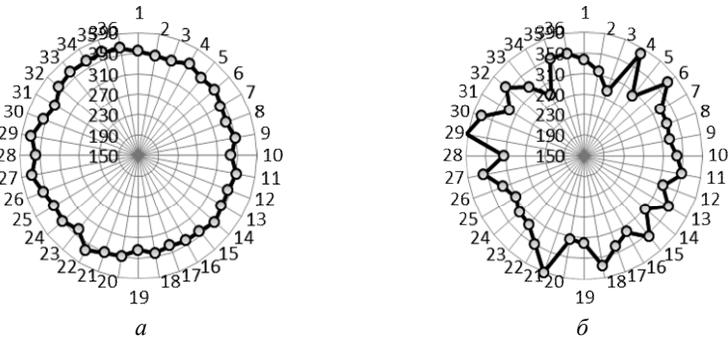


Рис. 3.23. Диаграмма распределения посевного материала экспериментальным (а) и серийным (б) распределителями между сошниками в зависимости от их массы: 150; 190...390 – шкала массы проб, г; 1, 2, 3...36 – номер отводящего патрубка

Таким образом, экспериментальный распределитель с оптимальными конструктивными параметрами позволил получить зна-

чения неравномерности распределения посевного материала для зерновых и зернобобовых культур в диапазоне от 3,8 до 6,0 %. На сеялке с серийными распределителями данный показатель находился в диапазоне от 9,6 до 15,5 % при агротехнически допустимом диапазоне от 5 до 6 %. Проведена оценка существенности средней разности сопряженных выборок по t -критерию Стьюдента. Сопоставляя фактические значения критерия t_{ϕ} с теоретическими $t_{0,05}$ (табличными), приходим к выводу, что при высеве семян пшеницы $t_{\phi} = 3,06 > t_{\tau} = 1,96$, ячменя – $t_{\phi} = 4,37 > t_{\tau} = 1,96$, ржи – $t_{\phi} = 3,3 > t_{\tau} = 1,96$, гороха – $t_{\phi} = 2,2 > t_{\tau} = 1,96$. Таким образом, для всех исследуемых культур разность существенна при 5%-м уровне значимости, а так как во всех случаях она ниже у экспериментального распределителя, то он более качественно распределяет посевной материал между сошниками.

3.4.5. Определение влияния параметров питателя эжекторного типа на его функциональные свойства

Основные геометрические параметры проточной части питателя (рис. 3.24) (углы сужения конфузора α_1 , α_2 и угол расширения диффузора β) были определены расчетным методом во второй главе.

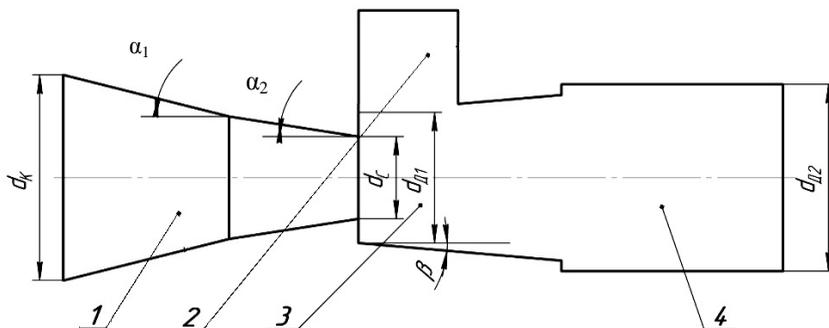


Рис. 3.24. Схема экспериментального питателя эжекторного типа:
1 – конфузор; 2 – загрузочная горловина; 3 – приемная камера; 4 – диффузор

Расчет проводился для питателя с переменными углами конфузора, обеспечивающими меньшее аэродинамическое сопротивление, по сравнению с одноступенчатым. При этом установлено, что

наиболее значимыми факторами, влияющими на служебные характеристики питателя, являются сужение первой ступени конфузора (угол α_1) и диаметр выходного сечения второй ступени конфузора (d_c). Однако при выполнении расчетов практически невозможно учесть совместное влияние всех менее значимых факторов. Поэтому была проведена экспериментальная проверка на адекватность результатов расчета.

Постоянными параметрами питателя были следующие: угол сужения второй ступени конфузора $\alpha_2 = 9^\circ$, угол расширения диффузора $\beta = 12^\circ$; диаметр конфузора на входе $d_k = 55$ мм; диаметр диффузора на входе $d_{л1} = 26$ мм и на выходе – $d_{л2} = 46$ мм; проходное сечение загрузочной воронки, равное 1200 мм^2 (обеспечивает свободное истечение посевного материала при максимальной норме высева).

Переменными факторами были угол сужения первой ступени конфузора α_1 и диаметр конфузора на выходе d_c .

Исследования проводились при высеве смеси люпина и гранулированных фосфорных удобрений. В качестве посевного материала был выбран люпин, так как норма высева его наибольшая по сравнению с другими культурами (до 400 кг/га).

В процессе экспериментальных исследований определялся количественный показатель: пропускная способность питателя эжекторного типа Q_M , кг/мин, а также качественный показатель – коэффициент вариации распределения посевного материала по сошникам v , %.

Для сокращения количества опытов применялся ортогональный центральный композиционный план второго порядка для двух факторов. Факторы и уровни их варьирования представлены в табл. 3.11.

Таблица 3.11

Факторы и уровни их варьирования

| Факторы, размерность | Обозначение | Границы варьирования | | | Параметры оптимизации | |
|---|-------------|----------------------|-----|-----|-----------------------|-----|
| | | (–) | (–) | (–) | Y1 | Y2 |
| Угол сужения конфузора α_1 , град. | x_1 | 10 | 15 | 20 | Q_M | n |
| Диаметр выходного конфузора d_c , мм | x_2 | 22 | 24 | 26 | | |

Для каждого параметра оптимизации проведено по 9 вариантов опыта. Расчеты производились по методике, представленной в разделе 3.4.3. Значения факторов на нулевом уровне выбирались по результатам поисковых экспериментов.

Кодирование факторов осуществлялось по формуле

$$x_i = \frac{C_i - C_{0i}}{\varepsilon}, \quad (3.39)$$

где x_i – кодированное значение фактора; C_i и C_{0i} – натуральные значения фактора (соответственно, его текущее значение и значение на нулевом уровне); ε – натуральное значение интервала варьирования фактора.

$$\varepsilon = \frac{C_i^B - C_i^H}{2}, \quad (3.40)$$

где C_i^B и C_i^H – значение фактора, соответственно, на верхнем и нижнем уровне.

С помощью критерия Кохрена выполнялась проверка гипотезы об однородности дисперсий по выражению (3.12). Табличное значение критерия Кохрена выбиралось по табл. [152, с. 159, прилож. 2] и для чисел степеней свободы $f_1 = 2$ и $f_2 = 9$ $G(\alpha, f_k, k) = 0,477$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Расчетные значения критерия Кохрена представлены в табл. 3.12.

Таблица 3.12

Расчетные значения критерия Кохрена

| Параметр оптимизации | Y1 | Y2 |
|---|-------|-------|
| Расчетное значение критерия Кохрена G | 0,427 | 0,225 |

Из данных табл. 3.12 видно, что условие (3.12) выполняется для каждого параметра оптимизации. Следовательно, гипотеза об однородности построчных выборочных дисперсий не противоречит экспериментальным данным, что позволяет вычислить дисперсию воспроизводимости опытов. Дисперсия воспроизводимости опытов определялась по выражению (3.13). Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии приведены в табл. 3.13.

Таблица 3.13

Коэффициенты уравнения регрессии

| Коэффициенты уравнения регрессии квадратичной модели | Параметры оптимизации | |
|---|-----------------------|-------|
| | Y_1 | Y_2 |
| b_0 | 6,7 | 4,55 |
| b_1 | 0,07 | 0,13 |
| b_2 | -0,23 | -0,17 |
| b_{12} | -0,1 | -0,16 |
| b_{11} | -0,41 | 0,58 |
| b_{22} | -1,27 | 0,41 |

В итоге, модели второго порядка для каждого из параметров оптимизации принимают следующий вид:

$$Y_1 = 6,7 + 0,07x_1 - 0,23x_2 - 0,1x_{12} - 0,41x_{11} - 1,27x_{22}. \quad (3.41)$$

$$Y_2 = 4,55 + 0,13x_1 - 0,17x_2 - 0,16x_{12} - 0,58x_{11} - 0,41x_{22}. \quad (3.42)$$

Следующий этап обработки экспериментальных данных заключался в определении значимости полученных коэффициентов в уравнениях регрессии (3.41), (3.42). Значимость коэффициентов уравнения проверялась по t -критерию Стьюдента в формуле доверительного интервала (3.14). Затем определялись доверительные интервалы соответствующих коэффициентов (табл. 3.14). Табличное значение t -критерия Стьюдента $t_{(\alpha, f_b)}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f_b = 18$ равно 2,1.

Таблица 3.14

Статистическая оценка модели второго порядка и ее коэффициентов

| Статистические оценки | Параметр оптимизации | |
|-----------------------|----------------------|--------|
| | Y_1 | Y_2 |
| $S^2\{y\}$ | 0,0007 | 0,0036 |
| $S^2_{ад}$ | 0,0015 | 0,0057 |
| $\pm\Delta b_0$ | 0,05 | 0,13 |
| $\pm\Delta b_i$ | 0,07 | 0,15 |
| $\pm\Delta b_{ii}$ | 0,11 | 0,27 |
| $\pm\Delta b_{ij}$ | 0,08 | 0,19 |

Согласно условию (3.15) все коэффициенты уравнений регрессии (3.42), (3.44) и (3.45) являются значимыми, а коэффициенты при первом линейном члене и парном взаимодействии в уравнении (3.41) – незначимы. Адекватность уравнения регрессии экспериментальным данным проверялась по F -критерию Фишера. Табличные значения критерия Фишера выбирались по таблице для чисел степеней свободы $f_{\text{в}}$ и $f_{\text{ад}}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Расчетные и табличные значения критерия Фишера представлены в табл. 3.15.

Таблица 3.15

Расчетные значения критерия Фишера

| Параметр оптимизации | Y_1 | Y_2 |
|---|-------|-------|
| Расчетное значение критерия Фишера F | 2,218 | 1,587 |
| Табличное значение критерия Фишера $F(\alpha, f_{\text{ад}}, f_{\text{в}})$ | 3,16 | 2,7 |

Так как расчетные значения критерия Фишера не превышают табличные, следовательно, полученные уравнения адекватно описывают экспериментальные данные. Для перехода к обычной форме записи по выражению (3.10) определялся свободный член каждого уравнения. Окончательно уравнения регрессии для каждого из параметров оптимизации принимают следующий вид:

$$Y_1 = 6,7 + 0,07x_1 - 0,23x_2 - 0,1x_{12} - 0,41x_{11} - 1,27x_{22}. \quad (3.43)$$

$$Y_2 = 4,55 - 0,17x_2 + 0,58x_{11} + 0,41x_{22}. \quad (3.44)$$

Заключительным этапом математической обработки экспериментальных данных являлось определение оптимальной области значений исследуемых факторов на основании анализа поверхностей отклика, полученных методом двумерных сечений. Поверхности отклика и линии уровня поверхности отклика, построенные по уравнениям (3.8) и (3.9), представлены на рис. 3.25–3.27. С целью определения оптимальных параметров эжекторного питателя, удовлетворяющих двум параметрам оптимизации, полученные двумерные сечения параметров отклика (рис. 3.27) соединили воедино методом наложения.

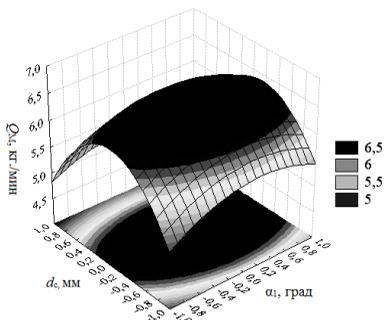


Рис. 3.25. Диаграмма поверхности отклика $Q_M = f(\alpha_1; d_c)$

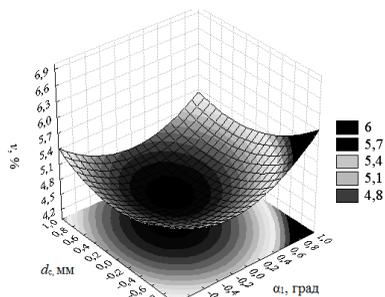


Рис. 3.26. Диаграмма поверхности отклика $v = f(\alpha; d_c)$

Полученная штриховая зона удовлетворяет двум параметрам оптимизации.

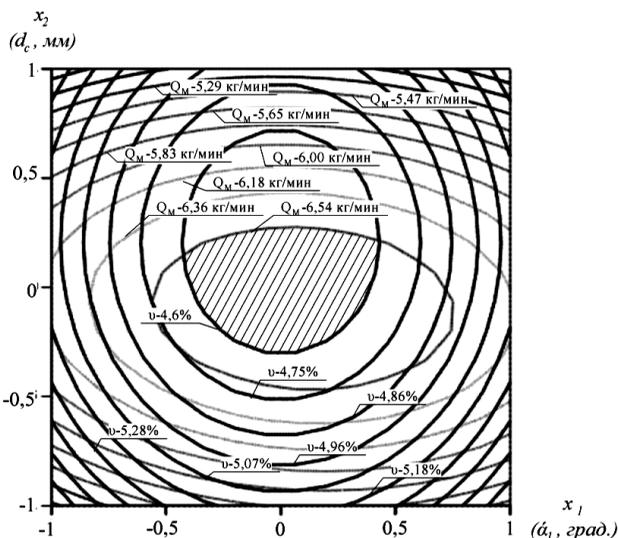


Рис. 3.27. Двумерные сечения поверхностей отклика $Q_M = f(\alpha; d_c)$ и $v = f(\alpha; d_c)$

Из анализа данной графической зависимости следует, что область оптимума для данных факторов находится в пределах их расчетных значений (табл. 3.16).

Таблица 3.16

Оптимальные параметры факторов

| Факторы | Область оптимума |
|---|------------------|
| Угол сужения конфузора α_1 , град. | 13...17 |
| Диаметр выходного конфузора d_C , мм | 23,5...24,5 |

Таким образом, экспериментально подтверждены теоретические предпосылки и определены оптимальные области значений основных факторов, оказывающих существенное влияние на служебные свойства питателя эжекторного типа.

Для определения зависимости производительности питателя эжекторного типа от разрежения в приемной камере питателя P_p , статического P_3 и динамического $P_{ДЗ}$ давлений на выходе из питателя, был проведен корреляционно-регрессионный анализ.

Многофакторный анализ предполагает выявление наличия и формы корреляционной зависимости между результативным показателем ($y(Q_M)$) и факторными признаками ($x_1(P_p)$, $x_2(P_3)$, $x_3(P_{ДЗ})$).

$$y = f(x_1, x_2, x_3). \quad (3.45)$$

Изучение множественной корреляционной зависимости начинается с построения матрицы парных коэффициентов корреляции как между результативным показателем и каждым из факторов, так и между самими факторными признаками (табл. 3.17).

Таблица 3.17

Матрица парных коэффициентов корреляции

| Факторы | Q_M | P_p | $P_{СТЗ}$ | $P_{ДЗ}$ |
|-----------|--------|--------|-----------|----------|
| Q_M | 1 | 0,978 | -0,949 | 0,986 |
| P_p | 0,978 | 1 | -0,904 | 0,995 |
| $P_{СТЗ}$ | -0,949 | -0,904 | 1 | -0,928 |
| $P_{ДЗ}$ | 0,986 | 0,995 | -0,928 | 1 |

Анализ матрицы парных коэффициентов корреляции проводится с целью дальнейшей минимизации количества факторных признаков, включаемых в многофакторную модель. Анализ первой строки матрицы позволяет произвести отбор факторных признаков, которые могут быть включены в модель множественной корреляционной

зависимости. Факторные признаки, у которых степень тесноты связи с результативным показателем высока (r близок к $|1|$), включаются в модель. Исключению подлежат те параметры, у которых степень тесноты связи является низкой ($r < 0,5$). Поскольку степень тесноты связи у всех параметров с Q_M высокая, то на данном этапе исключений не производится.

Следующим этапом является выбор уравнения регрессии и расчет его параметров. В многофакторном анализе обычно используют линейную зависимость:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3). \quad (3.46)$$

$$\begin{cases} a_1 - 0,904 \cdot a_2 + 0,995 \cdot a_3 = 0,978, \\ -0,904 \cdot a_1 + a_2 - 0,928 \cdot a_3 = -0,949, \\ 0,995 \cdot a_1 - 0,928 \cdot a_2 + a_3 = 0,986. \end{cases} \quad (3.47)$$

Решив систему уравнений (3.47) получим: $a_1 = 0,229$, $a_2 = -0,277$, $a_3 = 0,500$. Тогда уравнение регрессии в стандартном масштабе примет следующий вид:

$$\hat{y} = 0,229 \cdot x_1 - 0,227 \cdot x_2 + 0,5 \cdot x_3. \quad (3.48)$$

После перехода к натуральному масштабу уравнение регрессии примет следующий вид:

$$y = 3,868 + 0,784 \cdot x_1 - 1,141 \cdot x_2 + 1,651 \cdot x_3. \quad (3.49)$$

Коэффициент множественной корреляции служит показателем силы связи для множественной регрессии [151, с. 142–146]. В нашем случае $R = 0,99$, при этом коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0,98$. Он показывает, что вариация результативного признака в значительной мере обусловлена влиянием факторных признаков, включенных в модель [156]. Адекватность полученного уравнения регрессии проверялась по F -критерию Фишера как отношение дисперсии относительно среднего к остаточной дисперсии:

$$F = \frac{0,455}{0,009} = 50,56.$$

Табличное значение F -критерия Фишера выбиралось по таблице [152, с. 160, прилож. 3] для чисел степеней свободы $f_1 = 1$ и $f_2 = 25$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и составило 2. Для нашего случая $F = 50,56 > F(\alpha, f_1, f_2) = 2$. Согласно рекомендациям [151] уравнение является адекватным экспериментальным данным.

3.4.6. Определение поперечной неравномерности высева

Исследованию распределителей потока посевного материала горизонтального типа при высеве монокультур посвящены работы ученых Белорусской ГСХА К. К. Куриловича, А. С. Сентюрова, В. С. Астахова, Г. Н. Лысевского [71, 78, 95, 103]. Работы содержат обоснование конструктивных параметров распределителей для высева только однородных по составу материалов (семена зерновых, зернобобовых и овощных культур, травы, минеральных удобрений). Они не касались многокомпонентных полидисперсных материалов (смесь семян и минеральных удобрений), высев которых значительно отличается от ранее исследованных. Не устанавливалась также зависимость распределения материала от пространственной схемы системы высева (высота подъема распределителя относительно питателя и угол ввода материала в распределитель). Недостаточно изучено и влияние равномерности распределения семян по сечению материалопровода перед вводом его в распределитель.

В связи с этим для улучшения качества работы распределителей горизонтального типа (снижения неравномерности распределения по сошникам) были разработаны выравнивающие устройства (рис. 3.28), представляющие собой цилиндрическую трубу 1, на внутренней поверхности которой в шахматном порядке расположены сферические отражательные поверхности и далее – конический направлятель 2, расположенные соосно.

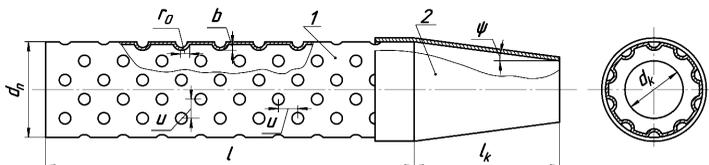


Рис. 3.28. Выравнивающее устройство распределителя горизонтального типа

Принцип работы выравнивающего устройства заключается в следующем. Посевной материал (зерновка и (или) гранула минеральных удобрений) поступает в выравниватель по материалопроводу и движется вдоль продольной оси в основном в нижней половине сечения. При входе в выравниватель некоторая часть его ударяется о сферические отражательные поверхности (преобладает косой удар) и, изменяя свое направление, сталкиваются еще и друг с другом. В результате таких соударений частицы распределяются по сечению материалопровода более равномерно и в таком как бы взвешенном состоянии материал поступает в конический направитель. Роль последнего заключается в сужении и, следовательно, ускорении потока для улучшения его рассева в распределителе. Это необходимо, так как транспортная скорость движения частиц при соударении их с отражательной поверхностью и между собой в трубе снижается. Кроме того, конический направитель снижает турбулентность потока воздуха, что приводит к снижению аэродинамических потерь.

Можно предположить, что частота соударений, и, следовательно, равномерность распределения потока материала по сечению материалопровода зависят от параметров выравнивающего устройства – длины, радиуса и высоты сферического отражательного элемента, расстояния между ними в продольном и поперечном направлениях, а также от скорости транспортирования материала и его концентрации. При этом размер поперечного сечения выравнивающего устройства должен быть достаточным для беспрепятственного перемещения материала с заданной концентрацией. Если длина устройства играет второстепенную роль (поисковые исследования показали, что она незначительно влияет на коэффициент вариации распределения по сошникам), то параметры отражательной поверхности – первостепенную. Таким образом, основные параметры, влияющие на выравнивание потока по сечению и улучшение работы распределительных устройств, – радиус r_0 и высота сферического отражательного элемента b и расстояние между этими элементами u .

В качестве отражательной поверхности выбрана сфера, так как она обладает малым аэродинамическим сопротивлением, проста в изготовлении, отсутствие острых кромок не приводит к травмированию семян и дроблению гранул минеральных удобрений, имеет большую площадь отражения.

Вероятность встречи частиц смеси постоянной концентрации с отражателем возрастает с увеличением площади отражательной

поверхности, зависящей от радиуса r_0 , высоты сферического отражательного элемента b и величины u . При этом есть вероятность того, что при определенном значении некоторое количество материала будет скользить по стенкам вдоль, не встречаясь с отражателями, что отрицательно скажется на равномерности распределения. Поэтому необходимо определить значения этих параметров, обеспечивающих равномерное распределение посевного материала в поперечном сечении.

Поэтому возникла необходимость провести экспериментальные исследования по определению зависимости неравномерности распределения посевного материала по сошникам (коэффициента вариации v) от конструктивных (высота сферического отражателя b) и технологических параметров (массовая подача материала Q_M , горизонтальный угол ввода материала в распределитель γ и высота подъема распределителя относительно питателя h).

При проведении опытов в качестве посевного материала использовались озимая рожь и гранулированный суперфосфат в соотношении 3:1. Влажность компонентов соответствовала агротехническим требованиям. Исследования проводились при значениях атмосферного давления, влажности и температуры воздуха, равных или близких к стандартным.

Принималась трехкратная повторность опытов – наиболее распространенная при технологических исследованиях, исходя из 95%-й надежности результатов.

При этом применялся метод планирования эксперимента при оптимизации многофакторных процессов.

Функциональная зависимость между параметром оптимизации и факторами

$$v = f(b, Q_M, \gamma, h), \quad (3.50)$$

где f – функция отклика.

Предварительные исследования показали нелинейный характер влияния данных факторов на коэффициент вариации. Поэтому для более точной формализации использовался полный ротатабельный центральный композиционный план второго порядка типа 2^4 , при котором варьирование факторов осуществляется на двух уровнях.

Перед началом эксперимента факторы кодировались по формуле (3.32). При этом происходит линейное преобразование факторного пространства с переносом начала координат в центр эксперимента и введение новых единиц измерения по осям.

В соответствии с требованиями ортогональности, для четырех переменных устанавливались значения уровней в принятом масштабе $-2; -1; 0; +1; +2$ и основные уровни изменения факторов заносились в табл. 3.8. Центр эксперимента (нулевая точка) определялся по рекомендациям [148].

Для центрального композиционного планирования второго порядка при k -факторах общее число точек плана [149]

$$N = 2^k + 2k + n_0, \quad (3.51)$$

где 2^k – число точек ядра плана; $2k$ – число звездных точек (при величине плеча $\alpha = 2$ для ротатабельного плана при $k = 4$); n_0 – число точек в центре плана эксперимента; k – число факторов.

В соответствии с матрицей планирования эксперимента проведено 25 опытов: 16 точек с варьированием факторов на уровнях $(+1; -1)$ сочетаются с девятью точками, из которых восемь звездных точек с плечами $(+2; -2)$ и одна центральная (0). Для оценки кривизны поверхности отклика добавлялись 6 параллельных точек в центре плана. Согласно рекомендациям [148] число повторностей в центре плана принимали равным 7 (табл. 3.18).

Таблица 3.18

Значение факторов в кодированном и натуральном виде

| Факторы | Обозначение | | Интервал варьирования | Уровни факторов в кодированном виде | | | | |
|------------------------------------|-------------|--------------|-----------------------|-------------------------------------|-----|----|-----|----|
| | натуральное | кодированное | | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 |
| <i>I</i> | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Высота сферического отражателя, мм | <i>b</i> | x_1 | 0,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 |
| Подача материала, г/с | Q_M | x_2 | 15 | 20 | 35 | 50 | 65 | 80 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|----------|-------|------|---|------|-----|------|-----|
| Горизонтальный угол ввода материала в распределитель, град. | γ | x_3 | 22,5 | 0 | 22,5 | 45 | 67,5 | 90 |
| Высота подъема распределителя относительно питателя, мм | h | x_4 | 100 | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 |

Для обеспечения равномерного внесения элемента случайности влияния неуправляемых и неконтролируемых факторов на отклик использовался принцип рандомизации, предусматривающий случайный порядок проведения опытов. Для этого применялись таблицы случайных чисел [150, с.189–197].

Полученные экспериментальные результаты обрабатывались по методике, представленной В. Б. Тихомировым для ротатбельного центрального композиционного плана второго порядка [149].

Оценка воспроизводимости эксперимента осуществлялась по G -критерию Кохрена. Табличное значение критерия выбиралось из таблицы [152, с. 159, прилож. 2] для чисел степеней свободы $f_1 = 2$ и $f_2 = 31$ $G(\alpha, f_1, f_2) = 0,198$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Тогда

$$G = \frac{0,091}{0,622} = 0,146 < G(\alpha, f_1, f_2) = 0,198.$$

Следовательно, гипотеза об однородности построчных выборочных дисперсий не противоречит экспериментальным данным, что позволяет вычислить дисперсию воспроизводимости опытов.

Полученные в результате обработки экспериментальных данных значения коэффициентов уравнения регрессии представлены в табл. 3.19.

Значимость полученных коэффициентов уравнения регрессии проверялась по t -критерию Стьюдента в формуле доверительного интервала. Табличное значение t -критерия Стьюдента $t_{(\alpha, f_B)}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f_B = 62$ равно 2,0 [152, с. 159, прилож. 1].

Таблица 3.19

Значения коэффициентов в уравнении регрессии

| Коэффициент | Значение | Коэффициент | Значение | Коэффициент | Значение |
|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|
| b_0 | 2,407 | b_{12} | 0,130 | b_{34} | 0,013 |
| b_1 | 0,078 | b_{13} | 0,069 | b_{11} | -0,111 |
| b_2 | 0,302 | b_{14} | 0,024 | b_{22} | 0,250 |
| b_3 | 0,215 | b_{23} | 0,215 | b_{33} | -0,067 |
| b_4 | -0,007 | b_{24} | 0,039 | b_{44} | -0,045 |

Доверительные интервалы коэффициентов уравнения регрессии представлены в табл. 3.20.

Таблица 3.20

Доверительные интервалы коэффициентов уравнения регрессии

| Переменная | x_0 | x_i | x_{ij} | x_{ii} |
|--------------------|-------|-------|----------|----------|
| Величина интервала | 0,062 | 0,033 | 0,041 | 0,030 |

Незначимыми являются коэффициенты при переменных x_4 , x_{14} , x_{24} , x_{34} . Указанные коэффициенты исключаются из уравнения регрессии, и оно принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}
 v = & 2,407 + 0,078 \cdot x_1 + 0,302 \cdot x_2 + 0,215 \cdot x_3 + \\
 & + 0,130 \cdot x_{12} + 0,069 \cdot x_{13} + 0,215 \cdot x_{23} - \\
 & - 0,111 \cdot x_{11} + 0,250 \cdot x_{22} - 0,067 \cdot x_{33} - 0,045 \cdot x_{44}.
 \end{aligned} \quad (3.52)$$

Адекватность полученной математической модели проверялась по F -критерию Фишера с доверительной вероятностью, равной 95 %. Табличное значение критерия Фишера выбиралось по таблице [152, с. 160, прилож. 3] для чисел степеней свободы $f_{\text{в}}$ и $f_{\text{ад}}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Тогда

$$F = \frac{0,033}{0,020} = 1,659 < F(\alpha, f_{\text{ад}}, f_{\text{в}}) = 2,102.$$

Так как расчетное значение критерия Фишера не превышает табличное, то уравнение регрессии адекватно описывает изучаемый процесс при 95%-й значимости. Из уравнения (3.52) видно, что фактор x_4 (высота подъема распределителя относительно питателя) является незначимым и не оказывает существенного влияния на изучаемый процесс. Наибольшее влияние (и это видно из коэффициентов при линейных членах) оказывают подача материала и горизонтальный угол ввода материала в распределитель, что отражается и в парных взаимодействиях. Фактор x_4 присутствует только при квадратичном члене уравнения. Для более детального и конкретного рассмотрения процесса на высеве различных культур совместно с гранулированными минеральными удобрениями в соотношении 3:1 были проведены дополнительные исследования. Эксперименты проводились при изменении одного фактора при остальных постоянных на нулевом уровне. Результаты проведенных исследований представлены на рис. 3.29–3.32. Из анализа уравнения регрессии и графических зависимостей следует, что исследуемые факторы (за исключением x_4) оказывают существенное влияние на выходной параметр (критерий оптимизации v). Технологические параметры (факторы x_2 и x_3) оказывают наибольшее влияние на изучаемый процесс, что показывают и коэффициенты при линейных членах, чьи зависимости, особенно фактора x_2 , не являются линейными. Конструктивный параметр (фактор x_1) также оказывает влияние на описываемый процесс, хотя и в несколько меньшей степени.

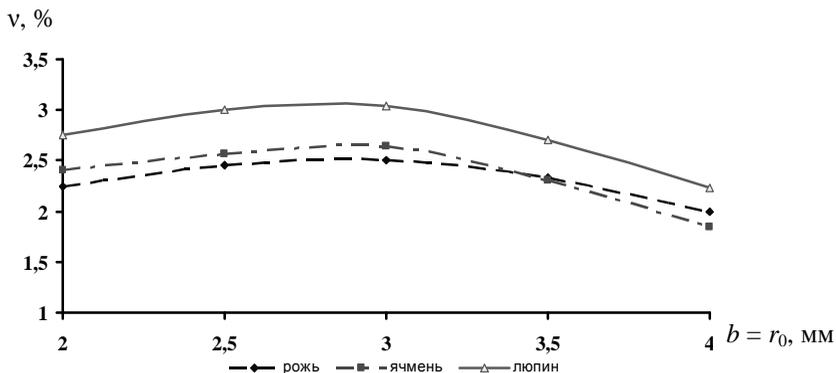


Рис. 3.29. График зависимости неравномерности распределения материала по семяпроводам от высоты сферического отражателя

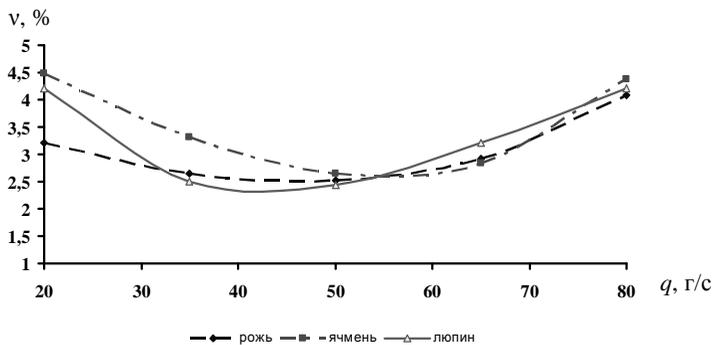


Рис. 3.30. График зависимости неравномерности распределения материала по семяпроводам от подачи материала

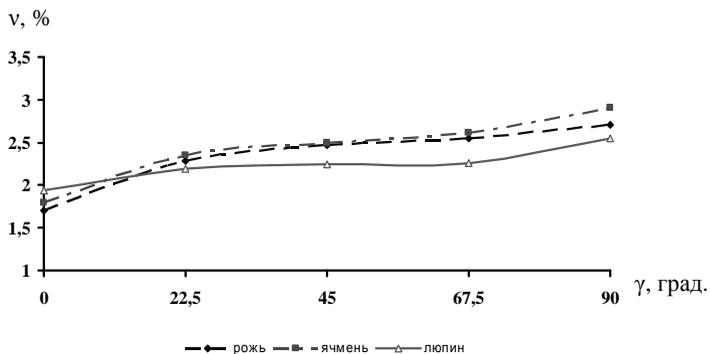


Рис. 3.31. График зависимости неравномерности распределения материала по семяпроводам от горизонтального угла ввода материала в распределитель

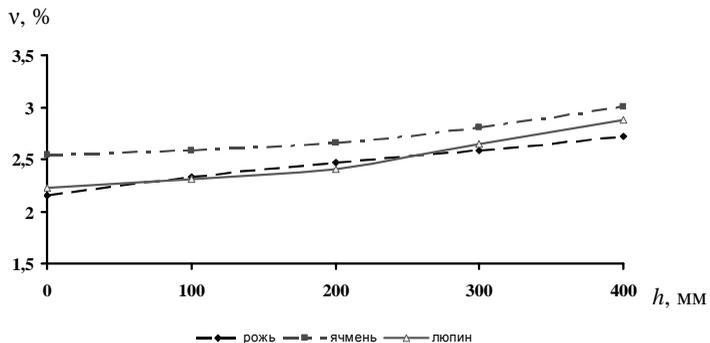


Рис. 3.32. График зависимости неравномерности распределения материала по семяпроводам от высоты подъема распределителя относительно питателя

Полученные графические зависимости и уравнение регрессии (3.52) можно использовать при проектировании пневматических систем высева, а также при технологической наладке посевных машин с целью снижения неравномерности распределения материала по поверхности поля.

3.4.7. Исследование продольной неравномерности высева

С агрономической точки зрения интерес представляет плотность оптимальных интервалов между семенами в рядке. Средняя величина этих интервалов определяется количеством семян, высеянных на единицу длины рядка. Поэтому, высев семян с обеспечением заданного интервала между ними является одной из главных задач системы высева.

Известно, что чем равномернее поток на выходе из высевающего аппарата, тем равномернее укладка посевного материала вдоль рядка. Данное утверждение относится к сеялкам с механической системой высева, рабочий процесс которых, с точки зрения статистической оценки случайных факторов, изучен достаточно полно. В сеялках с пневмомеханической высевающей системой на процесс оказывает влияние и питатель [157], обеспечивающий ввод посевного материала в пневмоматериалопровод. Для оценки этого влияния необходимо установить закон распределения вероятностей случайных величин.

Для этого проводились экспериментальные исследования по определению продольной неравномерности высева на экспериментальных установках. Фрагменты высева на ленту «бегущей дорожки» представлены на рис. 3.33.

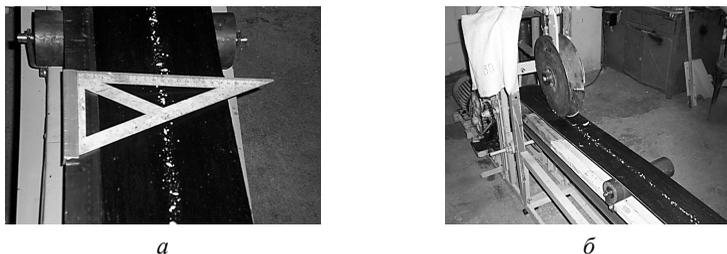


Рис. 3.33. Распределение посевного материала на ленте «бегущей дорожки»: а – способ замера; б – высев люпина с суперфосфатом

Равномерное распределение посевного материала по поверхности – результат совместного функционирования всех элементов сеялки: системы высева, семяпроводов и сошников. При этом семяпроводы и сошники являются второстепенными факторами, а основную роль играет высевающая система [117].

На равномерность распределения вдоль ряда в пневмомеханической высевающей системе оказывает влияние дозатор. Чаще всего на зерновых сеялках применяются катушечные дозаторы с желобчатой или штифтовой катушкой, основным недостатком которых является пульсирующая подача материала. Кроме этого равномерность зависит и от типа питателя. Так, питатель эжекторного типа может приводить к пульсации воздушного потока и, как результат, к неравномерности распределения посевного материала по длине материалопровода, следовательно – вдоль ряда. Питатель типа «шлюзовой затвор» приводит к пульсирующей подаче, характерной для катушечных дозаторов [80]. Также на равномерность влияют и параметры транспортирующего воздушного потока и тип распределителя.

Качество рядового посева в соответствии с ТКП 078–2007 оценивается продольной неравномерностью распределения – числом 5-сантиметровых отрезков с 0, 1, 2, 3, ..., n семенами (дискретное распределение) или плотностью величин интервалов между семенами (непрерывное распределение).

В зерновых сеялках с аппаратами непрерывного действия распределение квадратов с семенами в продольном направлении достаточно точно описывается законом Пуассона. Поэтому частота появления отрезков с различным числом семян P_m является вероятностной величиной и определяется из выражения [154]

$$P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad (3.53)$$

где a – среднее число семян в отрезке (плотность); m – случайное число семян.

Закон Пуассона применяется при достаточно больших объемах выборки (количество участков замера должно быть не менее 100) [158].

Для проверки соответствия плотности распределения, полученной эмпирическим путем по данным выборки, с теоретической плотностью распределения используется критерий согласия χ^2 (критерий Пирсона).

Критерий согласия

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - F_i)^2}{F_i}, \quad (3.54)$$

где f_i – эмпирическая частота; F_i – теоретическая частота.

Можно предположить, что неравномерность распределения при пневмомеханической системе высева также подчиняется закону Пуассона. Однако это только гипотеза, требующая проверки.

Область принятия гипотезы определяется неравенством

$$\chi^2 \leq \chi_{v;\alpha}^2, \quad (3.55)$$

где $\chi_{v;\alpha}^2$ – табличное значение критерия Пирсона.

Расчетное значение критерия Пирсона χ^2 определяли с помощью пакета программ Statistica 6.0. Если выборочное значение χ^2 больше $\chi_{v;\alpha}^2$ – гипотеза отвергается при уровне значимости α и наоборот: если выборочное значение χ^2 меньше табличного $\chi_{v;\alpha}^2$ – гипотеза принимается при уровне значимости α . При совпадении эмпирических и теоретических частот $\chi^2 = 0$. Чем меньше расхождение между частотами, тем меньше значение критерия χ^2 . Критерий может применяться при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Значение $\chi_{v;\alpha}^2$ выбирается по таблицам в зависимости от числа степеней свободы.

Число степеней свободы

$$K = r - s, \quad (3.56)$$

где r – число разрядов (интервалов); s – число наложенных связей (в нашем случае $s = 3$).

По таблице вероятностей для критерия Пирсона находится его критическое значение. При числе степеней свободы 3, числе интервалов 6 и при уровне значимости $\alpha = 0,05$ $\chi^2_{v;\alpha} = 7,81$. Проведена сравнительная оценка дискретного теоретического и эмпирического распределений посевного материала вдоль рядка. Объем выборки экспериментальных данных и результаты их обработки представлены в табл. 3.21.

Результаты теоретических и экспериментальных результатов для семян и удобрений графически представлены на рис. 3.34 и 3.35. Полученные значения критерия согласия Пирсона не превышают критическое значение $\chi^2_{v;\alpha}$, следовательно, гипотеза принимается. В работе [159] содержится предположение о распределении семян вдоль рядка при посеве зерновых культур, приближаемому к нормальному распределению (гаусовскому распределению).

Таблица 3.21

Результаты экспериментальных исследований дискретного распределения по закону Пуассона

| Культура | Количество семян в 5-сантиметровом отрезке, шт. | | | | | | Среднее число семян в отрезке, шт. | Значение критерия согласия Пирсона χ^2 ($\chi^2_{v;\alpha} = 7,81$) |
|--|---|----|----|----|----|---|------------------------------------|--|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| Рожь озимая + гранулированный суперфосфат | | | | | | | | |
| Рожь озимая | 25 | 52 | 46 | 28 | 14 | 0 | 1,72 | 5,84 |
| Суперфосфат | 36 | 66 | 39 | 15 | 6 | 0 | 1,31 | 4,32 |
| Ячмень + гранулированный суперфосфат | | | | | | | | |
| Ячмень | 24 | 56 | 43 | 19 | 9 | 0 | 1,56 | 5,94 |
| Суперфосфат | 20 | 54 | 43 | 25 | 9 | 0 | 1,66 | 7,22 |

В связи с этим были проведены исследования по определению закона непрерывного распределения посевного материала вдоль рядка зернотуковой пневмомеханической сеялкой. Результаты предыдущих исследований позволяют предположить, что продольное распределение наиболее полно подчиняется логнормальному закону распределения. Следовательно, частоты интервалов семян p близки к вероятностям, определяемых выражением [160]:

$$p(x) = \frac{1}{xa\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x/b))^2}{2a^2}}, \quad (3.57)$$

где $a = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k n_i (\ln x_i - \mu)^2}$ и $b = e^\mu$ – параметры выбранного распределения масштаба и формы соответственно, где $\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i \ln x_i$; r – число параметров принятого распределения (для логнормального распределения $r = 2$); x_i – середина i -го интервала; n_i – количество семян с i -м интервалом; $n = \sum_{i=1}^k n_i$ – объем выборки, где k – число интервалов.

Определение вероятности частоты интервалов между семенами и гранулами удобрений проводились отдельно для различных культур. Результаты обработки экспериментальных данных представлены в табл. 3.22 и на рис. 3.34 и 3.35.

Характер изменения вероятности продольной непрерывной неравномерности, определенной эмпирическим и расчетным путем для семян и удобрений, представлен на рис. 3.36 и 3.37.

Полученные эмпирические и теоретические значения частот проверялись с помощью критерия согласия Пирсона χ^2 по известной методике при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Таблица 3.22

Результаты экспериментальных исследований непрерывного распределения по логарифмически нормальному закону

| Культура | Среднее расстояние между семенами, мм | Среднее квадратическое отклонение, мм | Коэффициент вариации, % | Значение критерия согласия Пирсона χ^2 ($\chi^2_{v; \alpha} = 7,81$) |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---|
| Озимая рожь + гранулированный суперфосфат | | | | |
| Рожь озимая | 25,15 | 16,67 | 66,3 | 5,13 |
| Суперфосфат | 36,39 | 22,87 | 62,8 | 7,56 |
| Ячмень + гранулированный суперфосфат | | | | |
| Ячмень | 31,71 | 17,96 | 56,6 | 7,21 |
| Суперфосфат | 29,19 | 18,09 | 61,9 | 4,88 |

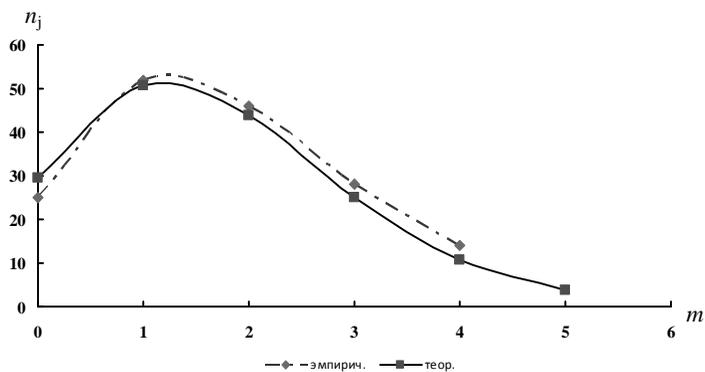


Рис. 3.34. График дискретного распределения семян озимой ржи при совместном высеве с гранулированным суперфосфатом

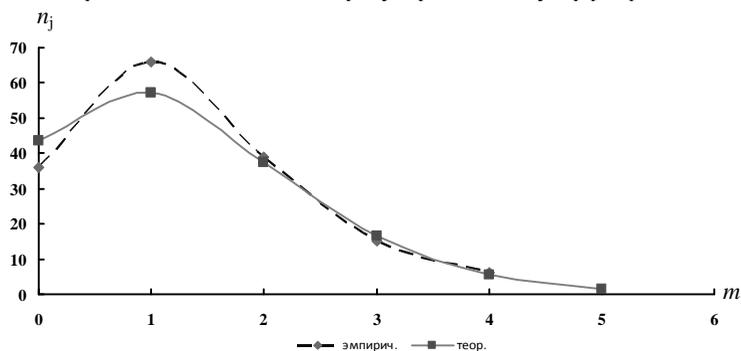


Рис. 3.35. График дискретного распределения удобрений при совместном высеве с озимой ржью

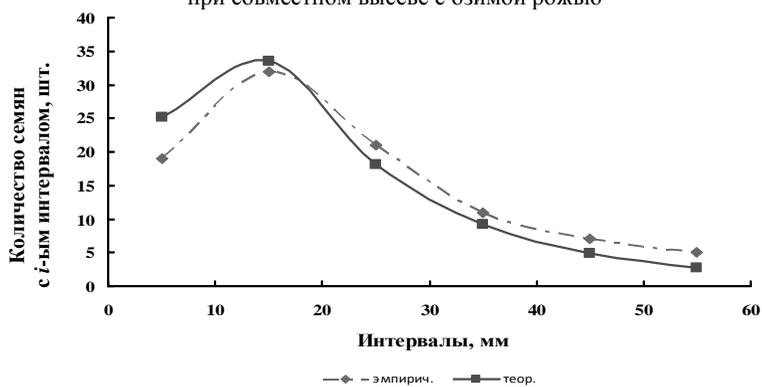


Рис. 3.36. График непрерывного распределения семян озимой ржи при совместном высеве с гранулированным суперфосфатом

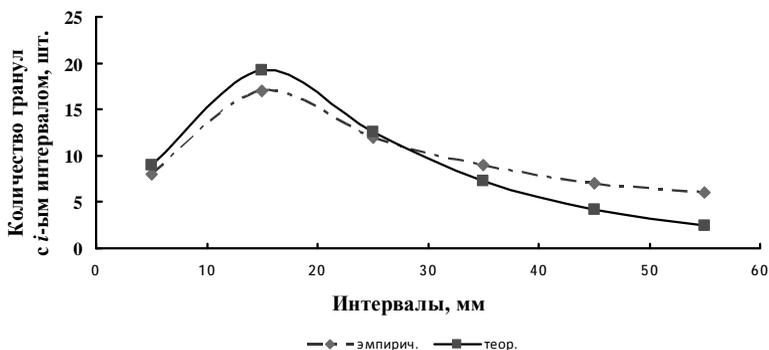


Рис. 3.37. График непрерывного распределения гранулированного суперфосфата при совместном высеве с озимой рожью

Из данных табл. 3.22 видно, что значения χ^2 меньше критического значения критерия $\chi^2_{\nu; \alpha} = 7,81$, следовательно, нулевая гипотеза принимается. На основании результатов статистической оценки можно сделать вывод о том, что продольное размещение посевного материала при дискретном определении неравномерности подчиняется закону Пуассона, а при непрерывном – логнормальному.

3.4.8. Натурные испытания распределителя горизонтального типа

Для подтверждения теоретических предпосылок и проверки на адекватность расчетных и экспериментальных результатов проводились испытания элементов системы высева с рациональными параметрами, определенными в результате выполняемых исследований на посевных машинах в стационаре (стендовые испытания) и в производственных условиях (полевые испытания). Натурные испытания проводились на почвообрабатывающе-посевном агрегате АППА-6, разработанном РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». Агрегат имеет пневмомеханическую высевающую систему группового дозирования с шестиканальными распределителями горизонтального типа. Дозаторы семян укомплектованы желобчатыми катушками, туковые – штифтовыми. Привод вентилятора осуществляется от гидросистемы трактора, частота вращения рабочего колеса вентилятора находится в пределах 3200...3400 мин⁻¹. При этом скорость транспортирующего воздушного потока составляет 20...25 м/с.

Установка нормы высева зерна производится изменением длины рабочей части катушки, а нормы внесения удобрений – изменением частоты вращения катушки. При стендовых испытаниях высев осуществлялся на $\frac{1}{2}$ рабочей ширины захвата сеялки (допускается по ГОСТ 31345–2007), в данном случае – это 24 сошника.

При этом были задействованы 4 питателя эжекторного типа и 4 распределителя потока посевного материала с выравнивающими устройствами. Навеска бралась из расчета посева 0,025 га. Семена и удобрения из каждого семяпровода высевали в сборники и взвешивали на весах ВЛКТ-500 с точностью до 1 г. Затем производился разбор проб для отделения семян от удобрений, которые взвешивались по отдельности. По полученным данным определялись коэффициент вариации неравномерности подачи посевного материала дозаторами зерна и удобрений, коэффициент вариации неравномерности распределения по 6 сошникам каждой группы и средний коэффициент вариации по распределителям. На основании этого определялся коэффициент вариации распределения посевного материала по 24 сошникам по формуле (2.105), сравнивались расчетные и экспериментальные значения, и определялось их отклонение. Погрешность рассчитывалась методами математической статистики. Результаты расчетов и эксперимента сведены в табл. 3.23.

Таблица 3.23

Результаты исследований

| № повторности | Коэффициент вариации v_c , % | | Погрешность, % |
|---------------|--------------------------------|----------------------|----------------|
| | согласно расчетам | по результатам опыта | |
| 1 | 4,35 | 4,28 | 1,54 |
| 2 | 2,91 | 3,00 | 2,82 |
| 3 | 4,02 | 3,99 | 0,72 |

При расчетах принимали $m_1 = 4$, а $m_2 = 6$.

Из данных табл. 3.23 видно, что отклонение расчетных значений коэффициента вариации от его экспериментальных не превышает 3 %, что говорит об удовлетворительной их сходимости [141].

На основании выражения [55, стр. 67] построена графическая зависимость (рис. 3.38), отражающая зависимость коэффициента вариации высева по сошникам v_c от среднего коэффициента вариации по распределителю v_{2cp} при фиксированных значениях данного коэффициента по дозаторам зерна v_1 и туков v_2 . На графике штрихом

выделена зона агротехнических требований на высеv зерновых культур (в соответствии с действующим в Республике Беларусь ТКП 078–2007 – не более 5 %).

Из анализа графика видно, что при среднем коэффициенте вариации распределения распределителем в пределах от 2 до 4 % (среднее значение неравномерности высева для зерновых культур для распределителей горизонтального типа) неравномерность дозирования дозаторами зерна и туков не должна превышать 4 % для заданных агротехнических требований.

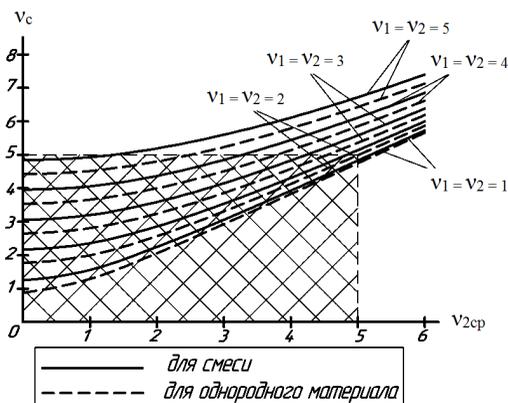


Рис. 3.38. График зависимости коэффициента вариации высева по сошникам v_{cp} от среднего коэффициента вариации пораспределителям v_{2cp}

Применение выражения (2.105) возможно при технологической настройке агрегатов и при проектировании пневматических высевающих систем группового дозирования. Исследования показали, что для обеспечения требуемой по поперечной неравномерности высева посевного материала по сошникам зерновых культур, при среднем коэффициенте вариации 6-канальным распределителем горизонтального типа 2 %...4 %, коэффициент вариации по дозаторам не должен превышать 4 %.

Таким образом, стендовые испытания показали, что разработанные питатели эжекторного типа и выравнивающие устройства распределителей потока посевного материала обеспечивают неравномерность распределения посевного материала по сошникам в пределах, предусмотренных агротехническими требованиями.

3.4.9. Изучение энергоемкости процесса высева

В пневматической системе высева энергия в основном затрачивается на перемещение посевного материала воздушным потоком, создаваемым вентилятором. Вследствие того, что пневмоматериалопровод гибкий и схема его укладки в реальных условиях пространственно сложная, изменяющаяся в течение выполнения технологического процесса, теоретически с необходимой точностью определить сопротивление сети затруднительно. Поэтому необходимая мощность для привода вентилятора определялась экспериментальным путем.

Замеры фазного напряжения и тока производились на экспериментальной установке универсальным прибором К4570/2Ц.

По фазным напряжению и току определялась потребляемая мощность по выражению (3.29). По полученным данным строили графическую зависимость потребляемой мощности от концентрации транспортируемого материала (производительности) (рис. 3.39).

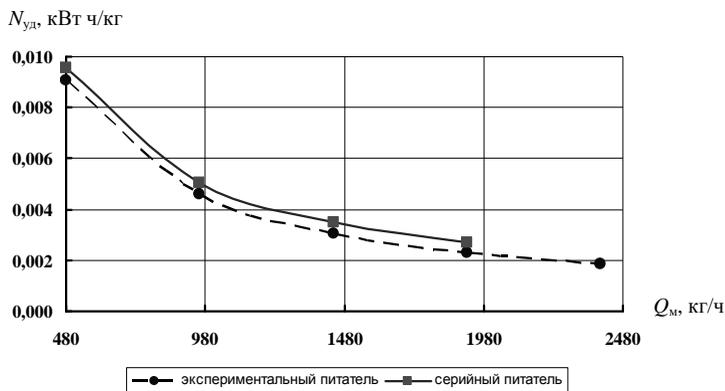


Рис. 3.39. График зависимости удельной энергоемкости от производительности

Из графика видно, что удельные затраты мощности на перемещение посевного материала составляют 0,0019 кВт·ч/кг с экспериментальными рабочими органами в системе (с серийными рабочими органами 0,0024 кВт·ч/кг) при длине транспортирования 4,5 м (максимальная длина пневмоматериалопровода в сеялках с шириной захвата 6 м) на максимальной производительности питателя, т. е. снижение энергоемкости составляет около 25 %.

В результате экспериментальных исследований получены следующие результаты:

– экспериментально подтверждены результаты теоретических исследований зависимости аэродинамического сопротивления и производительности (пропускной способности) питателя эжекторного типа от формы и геометрических параметров его проточной части;

– установлено, что при конструктивно принятых одинаковых размерах входного и выходного сечений питателя диаметром 50 мм, двухступенчатом сужении конфузора с углами $\alpha_1 = 15^\circ$, $\alpha_2 = 9^\circ$ до сечения диаметром 24 мм, угле раскрытия диффузора $\beta = 12^\circ$ до сечения диаметром 49,5 мм и ступенчатом его переходе до диаметра 50 мм обеспечивается производительность 6,7 кг/мин, что соответствует норме высева 540 кг/га в комплекте с 6-канальным распределителем посевного материала по сошникам. Полученная производительность на 10 % превышает максимальную агрономическую норму высева, равную 490 кг/га (400 кг (семена) + 90 кг (фосфорные удобрения)) и позволяющую поддерживать стабильный процесс транспортирования;

– исследована зависимость неравномерности распределения посевного материала по сошникам от конструктивно-технологических параметров системы высева. Установлено, что значения неравномерности распределения, отвечающие агротехническим требованиям при высеве зерновых и зернобобовых культур одновременно с припосевной «стартовой» дозой фосфорных удобрений, достигаются при высоте сферических отражателей выравнивающего устройства с радиусом сферы $b = 4$ мм, превышении по высоте распределителя потока посевного материала относительно питателя $h = 100 \dots 200$ мм и его горизонтальном угле ввода посевного материала в распределитель $\gamma = 22,5^\circ \dots 67,5^\circ$;

– определена продольная неравномерность распределения посевного материала в рядке. Этот показатель для зерновых культур находится в пределах 45 %...65 %, зернобобовых – 55...65, удобрений 45 %...65 %. Установлено, что при дискретном распределении подчиняются закону Пуассона, при непрерывном – логарифмически нормальному закону распределения;

– установлено, что удельные затраты мощности на перемещение посевного материала составляют 0,0019 кВт·ч/кг с экспериментальными рабочими органами в системе (с серийными рабочими органами 0,0024 кВт·ч/кг) при длине транспортирования 4,5 м.

ГЛАВА 4

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВО РАЗРАБОТАННЫХ ПОСЕВНЫХ МАШИН

4.1. Разработка и испытание экспериментального и опытного образца сеялки с пневматической системой высева

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в предыдущих главах, разработана экспериментальная установка для исследования работы пневматической системы высева зерновой сеялки.

Технологическая схема и общий вид экспериментального распределителя представлены на рис. 4.1, техническая характеристика – в табл. 4.1.

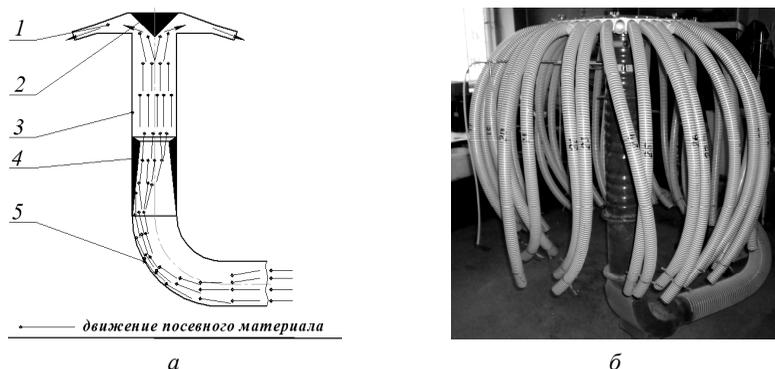


Рис. 4.1. Технологическая схема (а) и общий вид (б)
экспериментального распределителя:

- 1 – распределительная головка; 2 – направитель; 3 – вертикальная колонна;
4 – турбулизирующая вставка; 5 – отвод

Таблица 4.1

Техническая характеристика экспериментальной установки

| Наименование показателя | Значение |
|---------------------------------------|--------------|
| Тип машины | стационарный |
| Тип распределительного устройства | вертикальный |
| Пределы изменения параметров вставки: | |
| – угла сужения вставки, град. | 8...20 |
| – выходного диаметра, мм | 80...100 |

| Наименование показателя | Значение |
|---|----------|
| Норма высева, кг/га: | |
| – зерновых | 50...300 |
| – зернобобовых | 80...400 |
| Количество обслуживаемых семяпроводов, шт. | 36 |
| Производительность вентилятора, м ³ /ч | 2100 |
| Масса, кг, не более | 600 |

Устройство содержит отвод, вертикальную колонну, в которой установлена турбулизирующая вставка, и распределительную головку, в которой расположен направитель. Вертикальный распределитель работает следующим образом. Посевной материал, транспортируемый воздушным потоком к распределителю, проходит распределительную головку 1, турбулизирующую вставку 4 и отвод 5. На каждом из этих участков характер течения потока материало-воздушной смеси различный и определяется в основном конструктивными особенностями элементов устройства, а также аэродинамическими параметрами транспортируемого материала.

В отводе 5 посевной материал под действием инерционных сил концентрируется у поверхности с большим радиусом кривизны. В турбулизирующей вставке 4 в его впускной части происходит «сжатие» материало-воздушного потока и приближение его к центру. Аэродинамическое сопротивление и механическое сопротивление трения транспортируемого материала о поверхность незначительны вследствие его плавного сужения. При этом скорости периферийных слоев потока возрастают и выравниваются по всей площади поперечного сечения вставки. На выходе из последней образуется внезапное расширение, которое вызывает образование вихревых потоков транспортирующего воздуха по всему поперечному сечению вертикальной колонны 3. При этом образуются и отдельные вихри с отрицательным градиентом скорости. Все это вызывает интенсивное перемешивание транспортируемого материала с воздухом и формирование однородной материало-воздушной смеси. Далее смесь, встречаясь с направителем 2, равномерно распределяется по отводящим патрубкам распределительной головки 1.

Работа экспериментальной установки пневматической системы высева зерновой сеялки оценивалась согласно ТКП 078–2007 по следующим показателям: качество высева при хозяйственной

норме от 220 до 250 кг/га; отклонение фактической нормы высева от заданной; неустойчивость нормы высева; неравномерность нормы высева между сошниками; дробление семян. Результаты испытаний представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты исследовательских испытаний экспериментальной установки

| Наименование показателя | Значение показателя | | | | | |
|---|---------------------|-------------|--------|-------|-------|-------|
| | по ТКП 078–2007 | для культур | | | | |
| | | пшеница | ячмень | рожь | люпин | соя |
| Качество высева при хозяйственной норме высева семян, кг/га: – заданная – фактическая | | 220 | 220 | 230 | 250 | 110 |
| | | 227,3 | 225,2 | 236,2 | 257,4 | 112,6 |
| Отклонение фактической нормы высева от заданной, % | | 3,3 | 2,4 | 2,7 | 2,9 | 2,3 |
| Неустойчивость нормы высева, %: – зерновых – зернобобовых | 3,0, не более | 0,2 | 0,7 | 0,5 | | |
| | 5,0, не более | | | | 2,0 | 1,8 |
| Неравномерность высева между сошниками, %: – зерновых – зернобобовых | 5,0, не более | 3,2 | 3,9 | 4,5 | | |
| | 6,0, не более | | | | 5,1 | 4,7 |
| Дробление семян, %: – зерновых – зернобобовых | 0,5, не более | 0,2 | 0,3 | 0,4 | | |
| | 1,0, не более | | | | 0,6 | 0,7 |

В результате проведенных исследовательских испытаний установлено: качественные показатели работы экспериментальной установки соответствуют агротехническим требованиям, предъявляемым к посевным машинам. Так, неустойчивость нормы высева для зерновых культур находится в пределах от 0,2 до 0,7 %, зернобобовых – от 1,8 до 2 % при допустимых 3 и 5 % соответственно. Неравномерность высева между сошниками для зерновых культур находится в пределах от 3,2 до 4,5 %, зернобобовых – от 4,7 до 5,1 % при допустимых 5 и 6 % соответственно.

На основании полученных результатов разработан опытный образец пневматической зерновой сеялки С-9, конструктивная схема которой представлена на рис. 4.2.

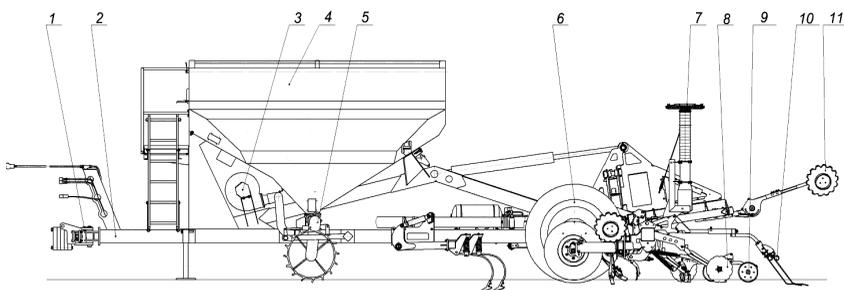


Рис. 4.2. Конструктивная схема сеялки пневматической зерновой С-9:

- 1 – поперечина; 2 – рама; 3 – вентилятор; 4 – бункер зерновой;
- 5 – дозатор; 6 – колесный ход; 7 – распределитель; 8 – сошники;
- 9 – опорно-прикатывающие колеса; 10 – загортач; 11 – маркер

Сеялка пневматическая зерновая С-9 состоит из следующих основных узлов и механизмов: поперечины присоединительного устройства 1, рамы 2, вентилятора транспортирования семян с гидрориводом 3; бункера зернового 4, двумя дозаторами катушечного типа 5; колесным ходом 6, двух распределителей 7 посевного материала, размещенных на сошниковом бруссе сеялки; двух посевных секций с однодисковыми сошниками 8, опорно-прикатывающими колесами 9 и пружинными загортачами 10; маркеров 11 образования технологической колеи; гидросистемы; системы электрооборудования, включающей систему управления, регулирования и контроля выполняемых технологических процессов; пневмоматериалопроводов.

Технологический процесс, выполняемый сеялкой, осуществляется следующим образом: при движении сеялки с трактором по полю

(в рабочем положении) посевной материал, подаваемый дозирующими аппаратами, транспортируется по пневмоматериалопроводам к распределительным устройствам вертикального типа; здесь происходит распределение посевного материала по семяпроводам и далее – по сошникам, которые заделывают посевной материал в почву на установленную глубину.

Общий вид опытного образца пневматической зерновой сеялки С-9, изготовленного ОАО «Брестский электромеханический завод», на рис. 4.3 представлен в положениях рабочем, транспортном и при загрузке посевного материала. Сеялка представляет собой полунавесную машину, которая предназначена для рядового посева семян зерновых колосовых, среднесеменных зернобобовых и других аналогичных им по размерам, норме высева и глубине заделки семян культур.



а



б



в

Рис. 4.3. Сеялка пневматическая зерновая С-9 в положениях:
а – рабочем; *б* – транспортном; *в* – при загрузке посевного материала

Расположенные перед сошниками регулируемые рыхлители-выравниватели в определенной степени крошат и выравнивают поверхностный слой почвы, расположенные за сошниками опорно-прикатывающие обрезиненные колеса уплотняют в рядках семена и поверхностный слой почвы, а загортачи присыпают заделанные семена рыхлой почвой и в целом выравнивают профиль обработанной и засеянной почвы.

В результате проведенных исследований была усовершенствована конструкция сеялки. В частности, разработан вертикальный распределитель для получения показателей неравномерности распределения посевного материала по сошникам согласно агротехническим требованиям. Устройство содержит отвод, вертикальную колонну, в которой установлена турбулизирующая вставка, и распределительную головку, в которой установлен направитель. Общий вид распределителя вертикального типа представлен на рис. 4.4.

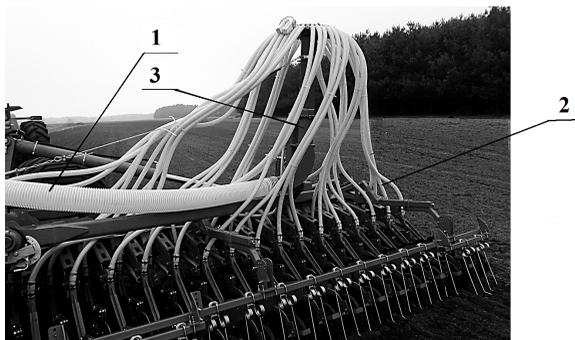


Рис. 4.4. Распределитель посевного материала вертикального типа:
 1 – пневмоматериалопроводы; 2 – семяпроводы;
 3 – распределитель посевного материала

По результатам проведенных исследовательских испытаний был разработан опытный образец пневматической зерновой сеялки С-9, техническая характеристика которой представлена в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Техническая характеристика опытного образца пневматической зерновой сеялки С-9

| Наименование показателя | Значение |
|---|-------------------------------------|
| Тип машины | полунавесной |
| Тип распределительного устройства | вертикальный пассивного действия |
| Агрегатирование, класс трактора | 5 |
| Производительность за 1 ч основного времени, га | 7,2...13,5 |
| Рабочая скорость, км/ч | 8...15 |
| Рабочая ширина захвата, м | 9,1±0,1 |
| Ширина междурядий, см | 12,5±0,5 |

Окончание таблицы 4.3

| Наименование показателя | Значение |
|--------------------------------------|----------|
| Глубина заделки семян, см: | |
| – зерновые | 2...6 |
| – зернобобовые | 3...7 |
| Норма высева, кг/га: | |
| – зерновых | 50...300 |
| – зернобобовых | 80...400 |
| Масса (конструктивная), кг, не более | 8000 |

Государственные приемочные испытания сеялки С-9 проводились в ГУ «Белорусская МИС». Приемочные испытания опытного образца сеялки проводились с целью оценки ее соответствия требованиям технического задания и действующих нормативных правовых актов согласно рабочей программе испытаний. Условия и режимы испытаний соответствовали требованиям технического задания, оценка показателей производилась по ГОСТ 31345–2007. Эксплуатационно-технологические показатели с соответствующими функциональными показателями качества выполнения технологического процесса и показатели надежности сеялки С-9 определялись при посеве яровых и озимых культур в сельскохозяйственных предприятиях Пуховичского района Минской области – сельскохозяйственном филиале ОАО «Управляющая компания холдинга «Минский моторный завод» “Светлая Нива”», РСДУП «Экспериментальная база «Зазерье» и в ОАО «Молодая гвардия» Брестского района.

Основные показатели качества выполнения технологического процесса сеялки по результатам испытаний представлены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Функциональные показатели работы системы высева С-9

| Наименование показателя | Значение показателя | | | | |
|--|---------------------|-------------|----------|----------|----------|
| | по ТКП 078–2007 | для культур | | | |
| | | пшеница | ячмень | рожь | горох |
| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> |
| Качество высева при хозяйственной норме высева семян, кг/га: | | | | | |
| – заданная | | 228 | 222 | 235 | 251 |
| – фактическая | | 237,1 | 232,2 | 238,5 | 262,4 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|---------------|------|-----|-----|-----|
| Отклонение фактической нормы высева от заданной, % | | 4,0 | 4,6 | 1,5 | 4,5 |
| Неустойчивость нормы высева, %: | | | | | |
| – зерновых | 3,0, не более | 0,1 | 1,2 | 0,3 | |
| – зернобобовых | 5,0, не более | | | | 1,4 |
| Неравномерность высева между сошниками, %: | | | | | |
| – зерновых | 5,0, не более | 3,9 | 3,8 | 4,5 | |
| – зернобобовых | 6,0, не более | | | | 6,0 |
| Дробление семян, %: | | | | | |
| – зерновых | 0,5, не более | 0,21 | 0,2 | 0,3 | |
| – зернобобовых | 1,0, не более | | | | 0,5 |

Анализ данных таблицы показал, что испытываемая пневматическая система высева удовлетворяет требованиям ТКП 078–2007 для посевных машин в Республике Беларусь по неустойчивости нормы высева, неравномерности распределения посевного материала по сошникам и его дроблению на высевах зерновых и зернобобовых культур. Это основные показатели, которые определяют качество работы системы высева и в определенной мере оказывают положительное влияние на развитие растений.

Новые технические решения, реализованные в пневматической системе зерновой сеялки С-9, защищены патентами Республики Беларусь на полезную модель № 8497 «Устройство для пневматического высева сыпучих материалов», № 8622 «Высевающий аппарат», № 9969 «Распределительная головка пневматической сеялки для высева сыпучих материалов».

4.2. Расчет экономической эффективности применения сеялки С-9 с пневматической системой высева

Целесообразность применения разработанной сеялки оценивается ее экономической эффективностью в сравнении с аналогами.

В качестве аналога для С-9 принята пневматическая широкозахватная сеялка СПШ-9. Выбранный аналог имеет пневматическую систему высева и позволяет производить посев зерновых, зернобобовых и промежуточных культур.

Расчет оценки экономической эффективности выполнялся по методике экономической оценки новой техники с использованием нормативно-справочных материалов и действующих тарифных ставок оплаты труда механизаторов и цен на топливо и смазочные материалы. Исходные данные для расчета представлены в табл. 4.5, полученные результаты расчета – в табл. 4.6.

Таблица 4.5

Исходные данные для расчета сравнительной экономической эффективности

| Наименование показателя | Значение по сеялке | |
|---|----------------------------|------------------------|
| | базовой | испытываемой |
| Технологическая операция | Посев семян озимой пшеницы | |
| Состав агрегата: – сеялка – трактор | СПШ-9 «Беларус-3022» | С-9 «Беларус-3022» |
| Обслуживающий персонал, чел., по категориям: – тракторист (количество/разряд) | 1/VII | 1/VII |
| Производительность, га/ч: – сменного времени – эксплуатационного времени | 7,00 6,84 | 7,00 6,84 |
| Удельный расход топлива, кг/га | 3,82 | 3,82 |
| Цена топлива с учетом стоимости смазочных материалов, тыс. руб./кг | 8,35 | 8,35 |
| Балансовая цена (без НДС), тыс. руб.: – сеялка – трактор | 915 000,0 900 536,0 | 680 000,0 900 536,0 |
| Коэффициент отчислений на амортизацию: – сеялка – трактор | 0,125 0,067 | 0,125 0,067 |
| Коэффициент отчислений на ТО и ремонт: – сеялка – трактор | 0,07 0,099 | 0,07 0,099 |

Окончание таблицы 4.5

| Наименование показателя | Значение по сеялке | |
|-------------------------|--------------------|--------------|
| | базовой | испытываемой |
| Годовая загрузка, ч: | | |
| – сеялка | 180 | 180 |
| – трактор | 1000 | 1000 |
| Годовая наработка, га | 1231,2 | 1231,2 |

Таблица 4.6

Результаты расчета сравнительной экономической эффективности

| Наименование показателя | Значение | |
|--|-----------|-------------|
| | для СПШ-9 | С-9 |
| Затраты труда на выполнение основной операции, чел.-ч/га | 0,143 | 0,143 |
| Прямые эксплуатационные затраты, тыс. руб./га, в том числе: | 207,915 | 165,913 |
| – на оплату труда | 1,271 | 1,271 |
| – на горюче-смазочные материалы | 39,87 | 35,087 |
| – на ТО и ремонт | 65,056 | 57,696 |
| – на амортизацию | 101,718 | 77,859 |
| Удельные капитальные вложения, тыс. руб./га | 874,834 | 683,964 |
| Приведенные затраты на единицу наработки, тыс. руб./га | 383,88 | 302,706 |
| Годовой приведенный экономический эффект, тыс. руб. | | 793 107,03 |
| Верхний предел цены новой машины, тыс. руб. | | 2 600 274,4 |
| Лимитная цена новой машины, тыс. руб. | | 2 080 219,4 |
| Степень снижения прямых эксплуатационных затрат, % | | 20,2 |
| Степень снижения капитальных вложений, % | | 21,8 |
| Степень снижения приведенных затрат, % | | 20,9 |
| Срок окупаемости полных капитальных вложений, лет | | 0,91 |

В результате проведенных испытаний установлено, что система высева обеспечивает стабильный высев требуемых норм семян в соответствии с агротехническими требованиями (по ТКП 078–2008).

Качественные показатели работы пневматической системы зерновой сеялки соответствуют агротехническим требованиям, предъявляемым к посевным машинам. Так, неустойчивость нормы высева для зерновых культур находится в пределах от 0,2 до 0,7 %, а зернобобовых – от 1,8 до 2 % при допустимых 3 и 5 % соответственно. Неравномерность высева между сошниками для зерновых культур находится в пределах от 3,2 до 4,5 %, зернобобовых – от 4,7 до 5,1 % при допустимых 5 и 6 % соответственно. По результатам приемочных испытаний рекомендовано поставить сеялку на производство.

Годовой приведенный экономический эффект (в неденоминированных рублях) от использования сеялки С-9 в сравнении с СПШ-9 составил 793,1 млн руб. (с учетом повышения урожайности в результате получения значений неравномерности распределения посевного материала по сошникам в соответствии с агротехническими требованиями). Срок окупаемости капитальных вложений – 0,91 года.

4.3. Испытания почвообрабатывающе-посевных агрегатов АППА-6 и АППА-4

На основании теоретических и экспериментальных исследований, разработаны и изготовлены элементы пневматической системы высева группового дозирования, которыми начали оснащать серийно выпускаемые почвообрабатывающе-посевные агрегаты семейства АППА-6 и АППА-4.

Государственные приемочные испытания этих агрегатов проводились на ГУ «Белорусская МИС». Внешний вид базовых модификаций представлен на рис. 4.5 и 4.6.



Рис. 4.5. Агрегат почвообрабатывающе-посевной АППА-6



Рис. 4.6. Агрегат почвообрабатывающе-посевной АППА-4

Агрегаты представляют собой комбинированные машины, которые за один проход производят предпосевную обработку почвы и рядковый посев зерновых, среднесемянных зернобобовых, крестоцветных и других (аналогичных им по размерам, норме высева и глубине заделки) культур с одновременным внесением в рядки припосевной дозы гранулированных фосфорных удобрений.

Все модификации агрегатов полунавесного типа. Они состоят из двух основных частей – почвообрабатывающей и посевной. Агрегаты шириной захвата 6 м АППА-6, АППА-6-01 и АППА-6-02 агрегируются с тракторами тягового класса 5, агрегаты шириной захвата 4 м АППА-4, АППА-4-01 и АППА-4-02 – с тракторами тягового класса 3. Различие модификаций заключается в типе почвообрабатывающей части (с активными и пассивными рабочими органами), адаптированной к конкретным типам почв и технологиям. Посевная часть у всех модификаций одинаковая. Почвообрабатывающая часть агрегата АППА-6 – роторный культиватор, АППА-6-01 – узкие рыхлительные оборотные лапы на S-образных пружинных стойках с подпружинниками, АППА-6-02 – ножевидные рыхлительные рабочие органы. Посевной частью является полунавесная сеялка, состоящая из следующих основных узлов и механизмов: бункер с дозаторами семян и удобрений; сошниковый брус; питатели эжекторного типа; горизонтальные шестиканальные распределители потока посевного материала; центробежный вентилятор с гидравлическим приводом; привод дозаторов; система контроля и управления выполнения технологического процесса (рис. 4.7–4.9).

Дозирующие устройства катушечного типа позволяют производить бесступенчатое изменение нормы высева семян от min до max и дискретное – припосевной дозы гранулированных фосфорных удобрений. Требуемая норма высева семян и удобрений может быть установлена на стационаре. Система контроля дает информацию

о наличии посевного материала в бункере, частоте вращения рабочего колеса вентилятора, вращении катушек дозаторов семян и удобрений. Кроме этого она обеспечивает в автоматическом или ручном режиме формирование технологической колеи.

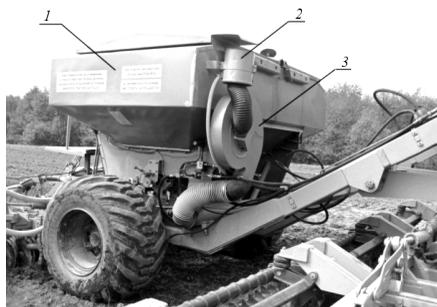


Рис. 4.7. Посевная часть агрегата АППА:
1 – бункер; 2 – циклон;
3 – вентилятор с гидроприводом

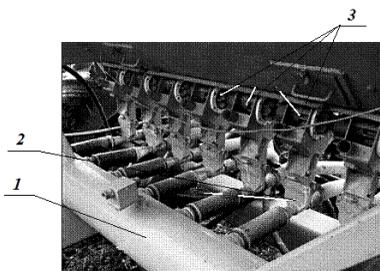


Рис. 4.8. Питатель эжекторного типа:
1 – ресивер, 2 – питатель
эжекторного типа, 3 – дозаторы семян

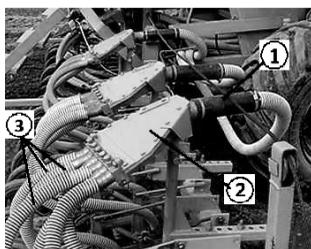


Рис. 4.9. Распределители посевного материала с выравнивающим устройством:
1 – выравнивающее устройство; 2 – распределитель посевного материала;
3 – семяпроводы

Технологический процесс, выполняемый агрегатами, включает рыхление посевного слоя, подуплотнение семенного ложа катковыми уплотнителями, укладку семян и удобрений в бороздки, раскрытые сошниками, прикатывание и заделку их почвой обрезиненными каточками. Мульчирование посевов производится пружинными загортачами (загортачи могут не устанавливаться).

Технологический процесс высева осуществляется следующим образом. Посевной материал от дозаторов семян и удобрений (при высеве припосевной дозы минеральных фосфорных удобрений) подается в питатели эжекторного типа, в которые вентилятором

из ресивера нагнетается воздух. Посевной материал захватывается воздушным потоком и транспортируется по пневмоматериалопроводам к распределителям посевного материала горизонтального типа с выравнивающим устройством. Здесь происходит распределение посевного материала по семяпроводам и далее – по сошникам, которые заделывают его в почву на требуемую глубину.

Отличительной особенностью агрегатов является использование различных по конструкции вентиляторов и их приводов. Так, если вентилятор на АППА-6 приводится в действие от гидросистемы трактора, то на АППА-4 применяется автономная гидросистема привода вентилятора с приводом ее от ВОМ трактора. Применение гидравлического привода позволяет снизить зависимость падения числа оборотов рабочего колеса вентилятора при падении оборотов коленчатого вала энергетического средства. Приемочные испытания опытных образцов агрегатов проводились на полях РСДУП «Экспериментальная база «Зазерье» РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» Пуховичского района, РСУП «Петровичи» Смолевичского района, СПК «Вишневецкий» и СПК «Каганец» Столбцовского района, СХЦ «Гайна» Логойского района Минской области. Агрегаты работали на посеве озимых и яровых зерновых культур, гречихи, проса и рапса с одновременным внесением припосевной дозы гранулированных фосфорных удобрений.

Условия и режимы испытаний соответствовали требованиям технического задания, оценка показателей производилась по ГОСТ 31345–2007.

Основные показатели результатов качества выполнения технологического процесса системы высева по результатам испытаний представлены в табл. 4.7 (для агрегата АППА-6) и 4.8 (для агрегата АППА-4).

Таблица 4.7

Функциональные показатели работы агрегата АППА-6

| Наименование показателя | Значение показателя | | | | |
|-----------------------------------|---------------------|--|----------|----------|----------|
| | по ТКП 078–2007 | по результатам испытаний (высев семян) | | | |
| | | Рожь с одновременным высевом гранулированного суперфосфата | Пшеница | Ячмень | Люпин |
| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> |
| Качество высева при хозяйственной | | | | | |

Окончание таблицы 4.7

| 1 | 2 | 3 | | 4 | 5 | 6 |
|---|---|------------|-----|-------|-------|-------|
| норме высева семян (удобрений), кг/га: – заданная (семян/удобрений) – фактическая (семян/удобрений) | | 210/83 | | 240 | 230 | 260 |
| | | 205,7/85,2 | | 248,6 | 231,8 | 244,1 |
| Отклонение фактической нормы высева от заданной, %: – семян – удобрений | 5,0, не более 10,0, не более | 2,0 | | 3,6 | 0,8 | 4,8 |
| | | 2,6 | | – | – | – |
| Неравномерность высева между дозаторами, %: – зерновых – зернобобовых – удобрений | 5,0, не более 4,0, не более 10,0, не более | | 0,2 | 2,0 | 1,3 | 1,4 |
| | | 2,6 | | | | |
| Неравномерность высева между сошниками, %: – зерновых – зернобобовых – удобрений | 5,0, не более 6,0, не более 10,0, не более | | 3,7 | 3,1 | 2,7 | 4,6 |
| | | 9,3 | | | | |
| Дробление семян, %: – зерновых – зернобобовых | 0,1, не более 1,0, не более | 0,1 | – | 0,1 | 0,1 | 0,44 |

Таблица 4.8

Функциональные показатели работы агрегата АППА-4

| Наименование показателя | Значение показателя | | | | |
|---|---------------------------------------|--|----------|----------|----------|
| | по ТКП 078–2007 | по результатам испытаний (высев семян) | | | |
| | | Ячмень с одновременным высевом гранулированного суперфосфата | Пшеница | Рожь | Люпин |
| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> |
| Качество высева при хозяйственной норме высева семян (удобрений), кг/га: – заданная (семян/удобрений) – фактическая (семян/удобрений) | | 200/65 | 220 | 220 | 258 |
| | | 196,4/60,2 | 218 | 213,4 | 255 |
| Отклонение фактической нормы высева от заданной, %: – семян – удобрений | 5,0, не более | 1,8 | 0,9 | 3,0 | 2,5 |
| | 10,0, не более | 7,4 | – | – | – |
| Неравномерность высева между дозаторами, %: – зерновых – зернобобовых – удобрений | 5,0, не более | | 1,3 | 0,8 | 1,1 |
| | 4,0, не более 10,0, не более | 0,5 | | | 2,1 |
| Неравномерность высева между сошниками, %: – зерновых | 5,0, не более | | 2,9 | 3,2 | 3,3 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------------------|-------------------|-----|---|-----|-----|
| – зернобобовых | 6,0, не более | 8,4 | | | 4,5 |
| – удобрений | 10,0, не более | | | | |
| Дробление семян, %: | | | | | |
| – зерновых | 0,1, не более | 0,1 | – | 0,3 | 0,1 |
| – зернобобовых | 1,0, не более | | | | 0,2 |

Данные таблиц показывают, что испытываемая пневматическая система высева удовлетворяет требованиям ТКП 078–2007 для посевных машин в Республике Беларусь по неравномерности высева между дозаторами, неравномерности распределения посевного материала по сошникам и его дроблению как на высевах одних семян, так и на высевах совместно с ними припосевной дозы фосфорных удобрений. Это основные показатели, которые определяют качество работы системы высева и в определенной мере оказывают положительное влияние на развитие растений.

В процессе испытаний проводилась сравнительная оценка всходов ячменя ярового и люпина узколистого, посеянных агрегатом АППА-6 на полях РСДУП «Экспериментальная база «Зазерье» РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» и в РУП «Шипяны–АСК» (рис. 4.10). При этом определялась неравномерность размещения растений вдоль рядка (табл. 4.9).



Рис. 4.10. Посевы ярового ячменя в РСДУП «Э/б «Зазерье» РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

В РУП «Шипяны–АСК» посев люпина узколистного АППА-6 выполнялся с внесением припосевной дозы гранулированного суперфосфата совместно с семенами в рядки с дозой 80 кг/га. Это позволяет объяснить более дружное появление всходов и лучшее развитие растений. Оценочные показатели работы системы высева при определении размещения растений в рядках представлены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Оценочные показатели расположения растений в рядках

| Тип системы высева | Культура | Среднее расстояние между растениями, мм | Среднее квадратическое отклонение, мм | Коэффициент вариации v , % | Безразмерный коэффициент равномерности μ_r |
|------------------------------|----------|---|---------------------------------------|------------------------------|--|
| Групповое дозирование | Ячмень | 34,9 | 18,6 | 53,2 | 0,53 |
| | Люпин | 40,97 | 22,3 | 54,4 | 0,55 |
| Централизованное дозирование | Ячмень | 33,19 | 39,25 | 118,26 | 0,50 |
| | Люпин | 39,19 | 26,96 | 68,81 | 0,50 |

Диаграммы размещения растений вдоль рядка по результатам полевого опыта представлены на рис. 4.11, 4.12, из анализа которых видно, что основное количество растений (82 % ячменя и 78 % люпина) находится в агротехнически допустимом интервале от 1 до 6 см, а коэффициент вариации растений вдоль рядка не превышает 75 %.

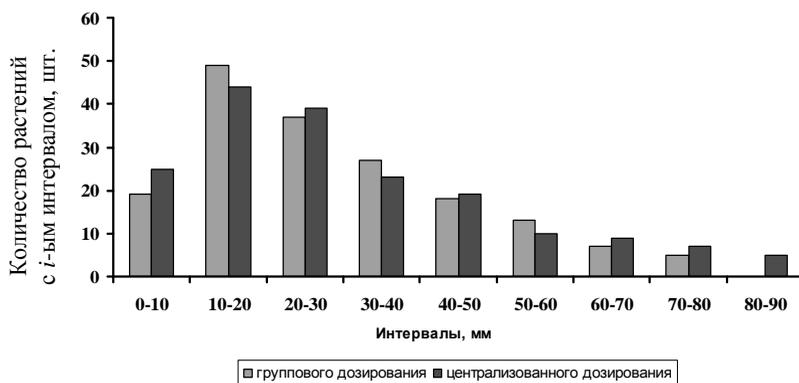


Рис. 4.11. Диаграммы размещения растений ячменя ярового вдоль рядка

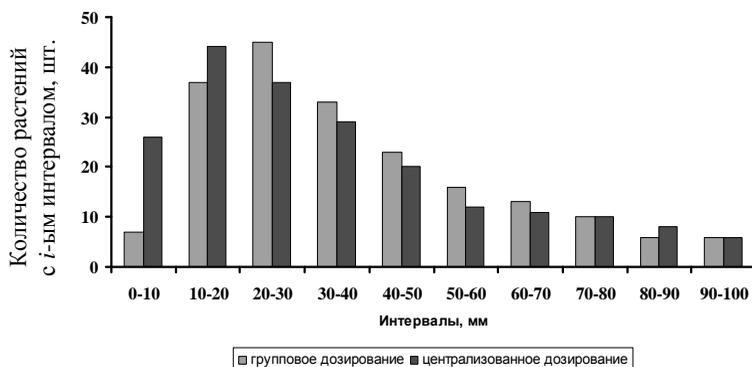


Рис. 4.12. Диаграммы размещения растений люпина узколистого вдоль ряда

Полученные распределения подчиняются логарифмически нормальному закону распределения случайной величины. Новые технические решения, реализованные в пневматической системе агрегатов АППА-6 и АППА-4, защищены патентами Республики Беларусь на полезную модель № 3729 «Распределитель высеваемых материалов пневматических сеялок», № 4278 «Устройство для подачи и распределения сыпучих материалов» и № 5528 «Устройство для подачи и распределения сыпучих материалов».

Анализ графических зависимостей представлен в табл. 4.10.

Таблица 4.10

Результаты исследований продольной неравномерности

| Тип системы высева | Культура | Расстояние между растениями в рядке, мм | | |
|------------------------------|----------|---|---------|-------|
| | | > 10 | 11...60 | < 60 |
| Групповое дозирование | Ячмень | 10,86 | 82,29 | 6,86 |
| | Люпин | 3,57 | 78,57 | 17,86 |
| Централизованное дозирование | Ячмень | 13,81 | 74,59 | 11,60 |
| | Люпин | 12,81 | 69,95 | 17,24 |

Целесообразность применения испытываемых агрегатов оценивается их экономической эффективностью в сравнении с аналогами. В качестве аналога для АППА-6-01 принят почвообрабатывающе-посевной агрегат АПП-6П производства ОАО «Лидагропроммаш», а для АППА-4 – АПП-4 производства ОАО «Брестский электро-

механический завод». Выбранные аналоги имеют пневматическую систему высева и позволяют производить посев зерновых, зернобобовых и промежуточных культур, но без внесения припосевной дозы гранулированных минеральных фосфорных удобрений. При расчете срока окупаемости дополнительно учитывали повышение урожайности от внесения гранулированных фосфорных удобрений совместно с семенами при посеве.

Расчет оценки экономической эффективности выполнялся по методике экономической оценки новой техники с использованием нормативно-справочных материалов и действующих тарифных ставок оплаты труда механизаторов и цен на топливо и смазочные материалы. Проведенные расчеты показывают, что годовой приведенный экономический эффект от использования агрегата АППА-4 – 101 216,5 тыс. руб. в сравнении с АПП-4 (с учетом повышения урожайности на 2,5 ц/га в результате внесения при посеве гранулированных фосфорных удобрений), от использования агрегата АППА-6-01 – 104 166,6 тыс. руб. в сравнении с АПП-6П. Лимитная цена в обоих случаях выше балансовой. Срок окупаемости капитальных вложений с учетом повышения урожайности от внесения припосевной дозы фосфорных удобрений составляет 1,3 года для АППА-4 и 2,3 года для агрегата АППА-6-01. Для вариантов 2 и 4, с учетом повышения урожайности от равномерности распределения посевного материала и применения комплекса машин для посева и внесения удобрений, годовой приведенный экономический эффект составил соответственно: 65 379,9 тыс. руб. при сроке окупаемости 3,7 года и 61 338,7 тыс. руб. при сроке окупаемости 2,1 года.

Разработанные на основании исследований элементы пневматической системы высева группового дозирования почвообрабатывающе-посевных агрегатов АППА-6, АППА-4 и их модификаций обеспечивают показатели работы системы в соответствии с агротехническими требованиями по неравномерности распределения посевного материала по сошникам (не более 5 % для зерновых, 6 – для зернобобовых и 10 % для минеральных удобрений), дроблению (не более 0,1 % для зерновых и не более 1 % для зернобобовых) и неустойчивости высева (3 % для зерновых, 5 – для зернобобовых и 10 % для минеральных удобрений).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее перспективной для широкозахватных высокопроизводительных сеялок и почвообрабатывающе-посевных агрегатов является пневматическая высеваящая система группового дозирования с питателями эжекторного типа и распределителями посевного материала вертикального или горизонтального типа, позволяющая создавать машины различной ширины захвата и обеспечивающая высев основных видов сельскохозяйственных культур одновременно с внесением припосевной дозы фосфорных удобрений с требуемой неравномерностью распределения посевного материала по сошникам. Кроме того, распределительные устройства вертикального типа, которые отличаются простотой и малой удельной материалоемкостью, позволяют создавать высокопроизводительные широкозахватные машины, обеспечивающие неравномерность распределения посевного материала по сошникам на уровне агротехнических требований.

Предложенная оригинальная классификация распределительно-транспортирующих систем пневматических посевных машин позволила провести комплексный анализ разнотипных пневматических высеваящих систем в совокупности всех их структурных элементов и обосновать на ее базе конструктивно-технологическую схему комбинированного распределительного устройства вертикального типа в виде соосно установленных турбулизирующей вставки конфузorno-диффузорной формы в вертикальной колонне и конусного направителя в распределительной головке.

Полученные в результате теоретических исследований аналитические зависимости, описывающие процесс движения посевного материала с учетом их физико-механических свойств в комбинированном распределительном устройстве вертикального типа, позволили установить рациональные параметры турбулизирующей вставки: угол сужения конфузора $\beta = 8^\circ \dots 20^\circ$, выходной диаметр $d = 80 \dots 100$ мм, высота конфузора $H_k = 110 \dots 429$ мм, угол расширения диффузора $\psi = 90^\circ$, высота диффузора $H_d = 20 \dots 30$ мм. Рациональный угол при вершине направителя для зерновых культур находится в диапазоне $\alpha = 37^\circ \dots 46^\circ$, для зернобобовых культур $\alpha = 34^\circ \dots 44^\circ$. Исходя из данных диапазонов угла α определили, что высота направителя H_n для зерновых культур находится в диапазоне $165 \dots 209$ мм, для зернобобовых культур $H_n = 173 \dots 229$ мм.

Обоснована конструктивная схема питателя эжекторного типа, представляющего собой конфузор с переменными углами сужения, ступенчатый диффузор и приемную камеру, расположенную на диффузоре. Такая схема питателя позволяет на 15 %...20 % уменьшить его аэродинамическое сопротивление и снизить потери давления, что способствует увеличению производительности и стабильному транспортированию посевного материала без расслоения. Получена аналитическая зависимость производительности питателя эжекторного типа от аэродинамической характеристики воздушного потока в его проточной части.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена зависимость неравномерности распределения посевного материала от неравномерности подачи его дозаторами. Установлено, что для обеспечения агротехнического требования по неравномерности распределения зерновых культур 5 % неравномерность подачи дозаторами не должна превышать 3 %. Обоснована необходимость соблюдения равенства аэродинамического сопротивления всех транспортирующих ветвей для обеспечения распределительными устройствами требуемой неравномерности распределения посевного материала по сошникам на всей ширине захвата посевной машины.

В результате регрессионного анализа проведенных экспериментов определены основные параметры проточной части питателей эжекторного типа: конфузор двухступенчатый с углами сужения $\alpha_1 = 15^\circ$ и $\alpha_2 = 9^\circ$, с диаметрами входного и выходного сечений $d_k = 55$ мм и $d_c = 24$ мм соответственно, угол расширения диффузора $\beta = 12^\circ$. При этом производительность питателя составляет 6,7 кг/мин (около 500 кг/га при рабочей скорости 10 км/ч), что в 1,86 раза выше по сравнению с серийным, а удельные энергозатраты на перемещение посевного материала ниже на 25 %. Экспериментально доказана эффективность влияния профилированного выравнивающего устройства, представляющего собой цилиндрический канал со сферическими отражателями на внутренней поверхности с радиусом сферы $b = r_0 = 3 \dots 4$ мм, на неравномерность распределения посевного материала по сошникам.

Уравнение регрессии, полученное в результате эксперимента, позволяет определить параметры взаимного пространственного расположения элементов системы высева, обеспечивающее требуемую неравномерность распределения посевного материала. Так,

высота подъема распределителя посевного материала относительно питателя должна быть $h = 100 \dots 200$ мм, угол ввода материала в распределитель в горизонтальной плоскости $\gamma = 45^\circ \dots 65^\circ$ при $Q_m = 45 \dots 65$ г/с. При этих условиях неравномерность распределения семян зерновых культур по сошникам составляет 2,8 %...3,7 %, зернобобовых – 3,5 %...4,5 %, удобрений – 7 %...9 % (обеспечивается снижение неравномерности на 35 %...40 %). Продольная неравномерность – 55 %...67 %, что на 20 %...50 % ниже, чем у систем централизованного дозирования. Распределение растений вдоль ряда подчиняется логарифмически нормальному закону при непрерывном распределении, при дискретном – закону Пуассона.

Экспериментальными исследованиями доказана целесообразность использования комбинированного распределительного устройства вертикального типа с турбулизирующей вставкой и направителем для снижения неравномерности распределения посевного материала по сошникам. На основе полученных регрессионных уравнений определены оптимальные конструктивные параметры турбулизирующей вставки: входной диаметр $D = 140$ мм, угол сужения конфузора $\beta = 15^\circ$, выходной диаметр конфузора $d = 88$ мм, высота конфузора $H_k = 198$ мм, угол расширения диффузора $\psi = 90^\circ$, высота диффузора $H_d = 26$ мм; конусного направителя: угол при вершине $\alpha = 40^\circ$, высота $H_n = 192$ мм. Применение разработанного вертикального распределителя с вышеуказанными конструктивными параметрами обеспечит неравномерность распределения семян по сошникам зерновых культур 3,2 %...4,5 %, зернобобовых – 4,7 %...5,1 %.

Применение разработанной сеялки С-9 по сравнению с базовой СПШ-9 позволило снизить прямые эксплуатационные затраты на 20,2 %, капитальные вложения – на 21,8 % и приведенные затраты – на 20,9 %. Ожидаемый годовой приведенный экономический эффект от использования сеялки С-9 с разработанным вертикальным распределителем в сравнении с сеялкой СПШ-9 составил 793,1 млн руб. Приемочные испытания опытного образца разработанной зерновой сеялки С-9 с вертикальным распределительным устройством (патенты Республики Беларусь № 8497, № 8622, № 9969) показали, что система высева обеспечивает стабильный высев требуемых норм семян, показатели неравномерности распределения семян по сошникам составляют для зерновых культур

3,8 %...4,5 %, зернобобовых – 6 %, что соответствует агротехническим требованиям (по ТКП 078–2008).

Результаты исследований также реализованы в пневматической системе высева почвообрабатывающе-посевных агрегатов семейства АППА-6 и АППА-4. Установлено, что система высева обеспечивает стабильный высев требуемых норм семян совместно с припосевной дозой фосфорных удобрений в соответствии с агротехническими требованиями. Годовой приведенный экономический эффект от использования агрегата АППА-4 составляет 101 216,5 тыс. руб. в сравнении с АПП-4, от использования агрегата АППА-6-01 – 104 166,6 тыс. руб. в сравнении с АПП-6П (с учетом повышения урожайности на 2,5 ц/га в результате внесения фосфорных удобрений и за счет равномерного распределения посевного материала по площади поля).

Полученные экспериментально-теоретические зависимости использованы при создании элементов пневматической системы высева зерновых и зернотуковых посевных машин, питателей и распределителей потока посевного материала при разработке:

- почвообрабатывающе-посевных агрегатов АППА-6, АППА-4 и их модификаций;
- агрегатов АППА-6-01, АППА-6, АППА-4 (патенты № 3729, № 4278, № 5528);
- при освоении серийного производства ОАО «Бобруйксельмаш» почвообрабатывающе-посевных агрегатов АППА-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственная программа развития аграрного бизнеса в Республике Беларусь на 2016–2020 годы. – Минск : ГИВЦ Минсельхозпрода, 2016. – 54 с.

2. Кадыров, М. А. О земледелии, селекции и рациональном хозяйствовании / М. А. Кадыров. – Минск : Несси, 2001. – 163 с.

3. Антышев, Н. М. Приоритеты развития сельскохозяйственных тракторов / Н. М. Антышев, В. Г. Шевцов // Техника в сельском хозяйстве. – 2004. – № 6. – С. 20–23.

4. Лепешкин, Н. Д. Теоретические предпосылки определения параметров проточной части эжекторных питателей / Н. Д. Лепешкин, Ю. Л. Салапура, А. Л. Медведев // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб.: в 2 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2010. – Вып. 44. – Т. 1. – С. 89–95.

5. Крючин, Н. П. Посевные машины. Особенности конструкции, тенденции развития / Н. П. Крючин. – Самара : Самарская ГСХА, 2003. – 185 с.

6. Лепешкин, Н. Д. Анализ посевной части почвообрабатывающе-посевных агрегатов и ее рабочих органов / Н. Д. Лепешкин [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб.: в 2 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2010. – Вып. 44. – Т. 1. – С. 74–82.

7. Хегай, П. А. О производительности широкозахватных сеялок централизованного высева / П. А. Хегай, Ю. К. Дубасов // НТБ ВИМ. – М., 1975. – № 41. – С. 16–19.

8. Машины посевные и посадочные. Правила установления показателей назначения: ТКП 078–2007. – Введ. 06.08.2007. – Минск : Беларус. научн. ин-т внедрения новых форм хозяйствования в АПК, 2007. – 40 с.

9. Бахмутов, В. А. Влияние равномерности размещения растений по площади на урожайность / В. А. Бахмутов, В. А. Любич // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – М., 1981. – № 5. – С. 9–11.

10. Кузнецов, М. К. Неравномерность высева семян зерновыми сеялками / М. К. Кузнецов [и др.]; под общ. ред. М. К. Кузнецова // Тракторы и сельхозмашины. – М., 1980. – № 7. – С. 17–18.

11. Ламан, Н. А. Формирование высокопродуктивных посевов зерновых культур / Н. А. Ламан. – Минск : Наука и техника, 1985. – 70 с.

12. Майсурян, Н. А. Прогрессивные способы посева зерновых культур. / Н. А. Майсурян. – М. : Изд-во М-ва сел. хоз-ва СССР, 1959. – С. 3–9.

13. Абдулрахман, Д. К. Изыскание и исследование дозирующих устройств для пневматической централизованной высевальной системы: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Д. К. Абдулрахман. – Горки, 1981. – 172 с.

14. Курбатов, А. В. О совершенных способах посева сельскохозяйственных культур / А. В. Курбатов // Прогрессивные способы посева зерновых культур. – М. : Наука, 1959. – С. 38–43.

15. Лепешкин, Н. Д. Качество посева и урожайность / Н. Д. Лепешкин, С. Ф. Лойко // Агропанорама. – 2006. – № 5. – С. 34–36.

16. Ламан, Н. А. Биологический потенциал ячменя: устойчивость к полеганию и продуктивность / Н. А. Ламан, Н. Н. Стасенко, С. А. Каллер. – Минск : Наука и техника, 1984. – 216 с.

17. Змиевский, В. Т. Обоснование агротехнического допуска неравномерности высева семян между аппаратами зерновых сеялок / В. Т. Змиевский [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 1983. – № 5. – С. 14–15.

18. Беднов, А. В. О равномерном распределении семян по площади / А. В. Беднов // Прогрессивные способы посева зерновых культур. – М., 1959. – С. 151–159.

19. Колясев, Ф. Е. Влияние способов посева на условия развития и урожайность зерновых культур / Ф. Е. Колясев // Прогрессивные способы посева зерновых культур. – М., 1959. – С. 10–32.

20. Ипполитов, Д. В. О способах посева зерновых культур / Д. В. Ипполитов // Прогрессивные способы посева зерновых культур. – М., 1959. – С. 33–38.

21. Хоменко, М. С. Механизация посева зерновых культур и трав: справочник / М. С. Хоменко, В. А. Зырянов, В. А. Насонов. – Киев : Урожай, 1989. – 168 с.

22. Клочков, А. В. Повышение продольной равномерности распределения семян сеялками СПУ / А. В. Клочков [и др.] // Агропанорама. – 2005. – № 3. – С. 22–25.

23. Яроцкий, Я. У. Агротехнические требования при посеве зерновых культур и их обеспечение с помощью пневматической сеялки

СПУ-6 / Я. У. Яроцкий [и др.] // Международный аграрный журнал. – 1999. – № 3. – С. 50–54.

24. Астахов, В. С. Механико-технологические основы посева сельскохозяйственных культур сеялками с пневматическими системами группового дозирования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / В. С. Астахов; СПб. гос. аграр. ун-т. – Горки, 2007. – 40 с.

25. Ивженко, С. А. Механико-технологические основы совершенствования пневматического посева: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / С. А. Ивженко. – Саратов, 1992. – 506 с.

26. Любушко, Н. И. Применение высеивающей системы с централизованным дозированием / Н. И. Любушко, В. А. Юзбашев, В. Е. Хоруженко // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1984. – № 6. – С. 15–17.

27. Шевырѐв, Л. Ю. Совершенствование процесса дозирования семян зерновых культур сеялкой с централизованным высевом: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Л. Ю. Шевырѐв. – Ростов-на/Д, 2004. – 159 с.

28. Липкович, Э. И. Проблемы комплектования АПК базовыми техническими средствами / Э. И. Липкович // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2007. – № 8. – С. 9–14.

29. Точицкий, А. А. Выбор и обоснование системы посева универсальной модульной сеялки / А. А. Точицкий [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб. / БелНИИМСХ; редкол.: И. С. Нагорский [и др.]. – Минск, 1996. – Вып. 35: Механизация земледелия, животноводства и кормопроизводства. – С. 94–103.

30. Любушко, Н. И. Применение высеивающей системы с централизованным дозированием и пневматическим транспортированием семян в зерновых сеялках / Н. И. Любушко, В. М. Гусев, А. И. Олонцев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1980. – № 3. – С. 12–13.

31. Астахов, В. С. Анализ пневматических централизованных высеивающих систем / В. С. Астахов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1997. – № 10. – С. 33–34.

32. Астахов, В. С. Механико-технологические основы посева сельскохозяйственных культур сеялками с пневматическими системами группового дозирования: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / В. С. Астахов; БГСХА. – СПб., 2007. – 40 с.

33. Астахов, В. С. Пневматические сеялки нового поколения / В. С. Астахов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1998. – № 10. – С. 7–8.

34. Астахов, В. С. Пневматические системы централизованного высева / В. С. Астахов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1997. – № 9. – С. 12–13.

35. Астахов, В. С. Посевная техника: анализ и перспективы развития / В. С. Астахов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1999. – № 1. – С. 6–9.

36. Гусев, В. М. Возможности пневматической системы централизованного высева пропашной сеялки / В. М. Гусев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1987. – № 6. – С. 28–27.

37. Жук, В. В. Пневматическая зерновая сеялка СЗПЦ-12 с централизованным дозированием / В. В. Жук, А. В. Божор, Н. И. Любушко // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1987. – № 12. – С. 32–33.

38. Журавлёв, Б. И. Пневматические сеялки / Б.И. Журавлёв. – М. : Агропромиздат, 1965. – 85 с.

39. Лачуга, Ю. Ф. Новые технологии и техника для сельского хозяйства России / Ю. Ф. Лачуга // Техника в сельском хозяйстве. – 2004. – № 6. – С. 5–9.

40. Любушко, Н. И. Применение высевающей системы с централизованным дозированием и пневматическим транспортированием семян в зерновых сеялках / Н. И. Любушко, В. М. Гусев, А. И. Олонцев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1980. – № 3. – С. 12–13.

41. Любушко, Н. И. Зерновые сеялки на рубеже XXI века / Н. И. Любушко, В. Н. Зволинский // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2001. – № 2. – С. 4–7.

42. Любушко, Н. И. Новые тенденции в создании и использовании комбинированных агрегатов / Н. И. Любушко, В. Н. Зволинский // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1997. – № 10. – С. 14–16.

43. Любушко, Н. И. Новые тенденции в создании и использовании комбинированных агрегатов / Н. И. Любушко, В. Н. Зволинский // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1997. – № 9. – С. 7–11.

44. Любушко, Н. И. Развитие конструкций распределительных систем для пневматических сеялок централизованного высева / Н. И. Любушко, В. Н. Зволинский // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1999. – № 2. – С. 20–23.

45. Любушко, Н. И. Разработка зерновых широкозахватных сеялок на базе автономных высевających систем / Н. И. Любушко, В. Н. Зволинский // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2003. – № 11. – С. 19–20.

46. Любушко, Н. И. Широкозахватная пневматическая зерновая сеялка СЗС-14 / Н. И. Любушко, А. П. Ковалешенко, Н. Н. Турчанинов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1986. – № 10. – С. 36–38.

47. Зубенко, Д. В. Высев зерновых культур пневматической системой с вертикальным распределительным устройством: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Д. В. Зубенко. – Минск, 2015. – 167 с.

48. Мазитов, Н. К. Российские блочно-модульные энерго-, ресурсосберегающие посевные комплексы / Н. К. Мазитов, В. В. Бледных, Р. С. Рахимов // Вестник ЧГАУ. – Челябинск, 2005. – Т. 46. – С. 137–141.

49. Рахимов, Р. С. Разработка и создание почвообрабатывающих посевных машин / Р. С. Рахимов, Н. Т. Хлызов // Вестник ЧГАУ. – Челябинск, 2005. – Т. 44. – С. 86–90.

50. Романов, М. Ф. Перспективность широкозахватных посевных агрегатов / М. Ф. Романов, В. А. Насонов, Е. С. Артамонов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1988. – № 2. – С. 22–24.

51. Хлызов, Н. Т. Обоснование параметров пневматической системы почвообрабатывающего посевного агрегата ППАБМ-14,7М / Н. Т. Хлызов, А. Н. Галимов // Вестник ЧГАУ. – Челябинск, 2007. – Т. 49. – С. 54–59.

52. Шаршуков, И. А. Параметры распределителя пневматической сеялки / И. А. Шаршуков // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – № 8. – С. 28–30.

53. Сариев, Ж. А. Применение посевного комплекса «Flexi coil ST-820» в опытно-производственных условиях / Ж. А. Сариев, В. В. Вьюрков, А. Е. Сарсенов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – № 2. – С. 33–35.

54. Пятаев, М. В. Качество посевных работ при использовании сеялок с пневматическим высевającym аппаратом / М. В. Пятаев // Достижения науки – агропромышленному производству: материалы XLVIII междунар. науч.-техн. конф. / ЧГАУ. – Челябинск, 2009. – Ч. 2. – С. 60–64.

55. Салапура, Ю. Л. Пневматическая система высева зернотуковой смеси со ступенчатым эжекторным питателем: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Ю. Л. Салапура. – Минск, 2011. – 192 с.

56. Шайхов, М. К. Состояние и перспективы развития посевной техники / М. К. Шайхов, Г. Г. Габдуллин // Земледельческая механика в растениеводстве: сб. науч. докладов междунар. науч.-практ. конф., Москва, 18–19 декабря 2001 г.: в 3 т., в 2 ч. / ВИМ; редкол.: Л. П. Кормановский [и др.]. – М., 2001. – Т. 3. – Ч. 2: Машинные технологии и техника для производства зерновых, масличных и зернобобовых культур. – С. 32–42.

57. Журавлёв, Б. И. Пневматические сеялки / Б. И. Журавлёв. – М. : Агропромиздат, 1965. – 85 с.

58. Сысолин, П. В. Почвообрабатывающие и посевные машины: история, машиностроение, конструирование / П. В. Сысолин, Л. В. Погорелый. – Киев : Феникс, 2005. – 264 с.

59. Адашь, А. В. Энергетическая оценка пневматических высевочных систем / А. А. Адашь, А. А. Татуев, И. А. Шаршуков // Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в АПК: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 3–4 июня 1997 г. / БГАТУ; под ред. Г. И. Януковича. – Минск, 1997. – С. 70–71.

60. Астахов, В. С. Принципиально новые распределители семян / В. С. Астахов, А. С. Сентюров // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1994. – № 10. – С. 27–31.

61. Адашь, А. В. Повышение качества посева семян пневматическими зерновыми сеялками путем совершенствования шнекового питателя: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А. В. Адашь. – Горки, 1997. – 181 с.

62. Брандт, Ю. К. Тенденции развития посевных и посадочных машин: обзорная информация / Ю. К. Брандт, В. А. Соколов. – М. : ВНИИТЭИСХ, 1978. – 51 с.

63. Лепешкин, Н. Д. Весенний сев под урожай 2010 года / Н. Д. Лепешкин, А. А. Точицкий, Ю. Л. Салапура // Белорусское сельское хозяйство. – 2010. – № 4. – С. 8–14.

64. Жук, В. В. Широкозахватные сеялки-культиваторы для почвозащитных технологий / В. В. Жук [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. – 1989. – № 2. – С. 45–50.

65. Клочков, А. В. Зарубежная сельскохозяйственная техника / А. В. Клочков, В. А. Попов. – Горки : Курсы по повышению квалификации и переподготовки кадров Могилевского облсельхозпрода, 1999. – 154 с.

66. Назараў, С. І. Тэхніка-эканамічная ацэнка сеялак з пнеўматычнымі цэнтралізаванымі высявальнымі сістэмамі / С. І. Назараў, В. С. Астахаў // Весці Акад. аграрных навук Беларусі. – 1995. – № 3. – С. 113–116.

67. Лепешкин, Н. Д. Обоснование рациональной системы посева зерновых пневматических сеялок / Н. Д. Лепешкин, А. Н. Юрин, Ю. Л. Салапура // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб.: в 2 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2009. – Вып. 43. – Т. 1. – С. 110–117.

68. Салапура, Ю. Л. Анализ пневматических систем посева для зерновых сеялок / Ю. Л. Салапура // материалы V Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей «Содружество наук. Барановичи–2009», Барановичи, 21–22 мая 2009 г.: в 2 ч. / Баранович. гос. ун-т; редкол.: В. Н. Зуев [и др.]. – Барановичи, 2009. – Ч. 1. – С. 23–24.

69. Салапура, Ю. Л. Прямой посев зерновых культур в условиях Республики Беларусь / Ю. Л. Салапура, Н. Н. Дягель // Инновационные процессы в АПК: сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. преподавателей, молодых ученых, аспирантов и студентов, посвящ. 50-летию образования РУДН, Москва, 24–26 марта 2010 г. / Рос. ун-т дружбы народов; под ред. В. Г. Плющикова. – М., 2010. – С. 41–43.

70. Халанский, В. М. Сельскохозяйственные машины / В. М. Халанский, И. В. Горбачев. – М. : Колосс, 2004. – 624 с.

71. Астахов, В.С. Совершенствование пневматических высевающих систем сеялок / В.С. Астахов. – Горки: УО «Могилевский гос. учебн. центр подгот., повыш. квалификац., переподгот. кадров, консультирования и аграр. реформы», 2007. – 148 с.

72. Зуев, Ф. Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях / Ф. Г. Зуев. – М. : Колос, 1976. – 344 с.

73. Дзядзю, А. М. Пневматический транспорт на зерноперерабатывающих предприятиях / А. М. Дзядзю, А. С. Кеммер. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Колос, 1967. – 295 с.

74. Heege, H. Pneumatische Soutgutrufeiland bei Samaschien / H. Heege, W. Zahres // Grundlangen der Landtechnik. – 1975. – № 4. – S. 12–13.

75. Pipping, G. Dosieren von saattgut – Luft Gemischen in pneumatischen Drillmaschmen / G. Pipping // Agrotechnik. – 1977. – № 12. – S. 14–15.

76. Курилович, К. К. Разработка и исследование пневматической сеялки для посева трав / К. К. Курилович // Сб. науч. тр. БСХА.

Совершенствование комбинированных почвообрабатывающих и посевных машин. – Горки, 1983. – Вып. 105. – С. 42–48.

77. Гусинцев, В. Г. Влияние механического разгона семян на энергетические затраты в пневматических централизованных высевальных системах / В. Г. Гусинцев // Сб. науч. тр. БСХА. Совершенствование комбинированных почвообрабатывающих и посевных машин. – Горки, 1983. – Вып. 105. – С. 48–51.

78. Сентюров, А. С. Исследование горизонтальных пневматических распределителей / А. С. Сентюров // Сб. науч. тр. БСХА. – Горки, 1976. – Вып. 25. – С. 88–93.

79. Карягдыев, М. Н. Разработка пневмоструйного тукорасеивающего органа кузовных машин с эжекторным питателем: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / М.Н. Карягдыев. – Харьков, 1989. – 186 с.

80. Jae Bum Park. Experimental study of pressure fluctuation in pneumatic conveying by various methods of analysis: diss. ... Doctor of Philosophy / Jae Bum Park. – Pittsburgh, 2006. – 103 p.

81. Каюшников, Ю. П. Исследование работы шнекового питателя применительно к пневматическим сеялкам для внесения минеральных удобрений / Ю. П. Каюшников // Труды ВИСХОМ. – М., 1972. – Вып. 70: Теоретические и эксплуатационные исследования рабочих органов сельскохозяйственных машин. – С. 178–183.

82. Урбан, Я. Пневматический транспорт / Я. Урбан; под ред. Л. М. Шведова. – М. : Машиностроение, 1967. – 257 с.

83. Шабуня, С. А. Исследование процесса посева сои сеялкой с диагональными катушечными высевальными аппаратами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С. А. Шабуня; Дальневосточ. гос. аграр. ун-т. – Благовещенск, 2006. – 22 с.

84. Крючин, Н. П. Обоснование условий повышения качества интервального распределения семян по длине рядка / Н. П. Крючин // Известия ФГОУ ВПО Самарская ГСХА. – 2008. – № 3. – С. 46–50.

85. Святков, С. Н. Пневматический транспорт измельченной древесины / С. Н. Святков. – М. : Лесная промышленность, 1966. – 320 с.

86. Святков, С. Н. Пневматический транспорт щепы / С. Н. Святков. – Л. : Изд. Ленинград. ун-та, 1967. – 64 с.

87. Дейч, М. Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин / М. Е. Дейч, Л. Е. Зарянкин. – М. : Энергия, 1970. – 381 с.

88. Нефедов, Б. А. Разработка и исследование рабочих органов для внутривспашечного внесения минеральных удобрений на лугах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Б. А. Нефедов; ВИМ. – М., 1978. – 20 с.

89. Скорляков, В. И. Дозатор для систем централизованного высева зерновых культур / В. И. Скорляков // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1988. – № 6. – С. 28–30.

90. Butters, G. Plastics conveying and bulk storage / G. Butters. – London-New Jersey, 1981. – 296 p.

91. Салапура, Ю. Л. Дозирование и ввод семян / Ю. Л. Салапура // Молодежь в науке–2007: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Горки, 4–5 октября 2007 г. / Белорус. гос. с.-х. акад.; редкол.: А. Р. Цыганов [и др.]. – Горки, 2007. – С. 154–158.

92. Лепешкин, Н. Д. Выбор типа питателя для пневмомеханической высевающей системы зерновой сеялки / Н. Д. Лепешкин, А. Л. Медведев, Ю. Л. Салапура // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–22 октября 2009 г.: в 3 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; редкол.: П. П. Казакевич [и др.]. – Минск, 2009. – Т. 1. – С. 108–113.

93. Лепешкин, Н. Д. Исследование некоторых элементов пневмомеханической высевающей системы зерновых сеялок / Н. Д. Лепешкин, А. Л. Медведев, Ю. Л. Салапура // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства. – Минск, 2007. – Вып. 41. – С. 142–148.

94. Лепешкин, Н. Д. Экспериментальные исследования питателя эжекторного типа для пневматических сеялок / Н. Д. Лепешкин [и др.] // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: збірник наукових праць / Кировоград. нац. техн. ун-т. – Кировоград, 2008. – Вып. 21. – С. 78–83.

95. Лысевский, Г. Н. Рабочий процесс и основные параметры пневматической распределительной системы для высева минеральных удобрений: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Г. Н. Лысевский. – Горки, 1984. – 190 с.

96. Астахов, В. С. Анализ распределителей семян для пневматических сеялок / В. С. Астахов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – № 5. – С. 31–33.

97. Chaohong Zhu. Ein Beitrag zur Theorie der Saatgutforderung und – verteilung bei einer pneumatischen Getreibesamaschinen: diss. ... Doctor der Agrarwissenschaften / Chaohong Zhu. – Stuttgart-Hohenheim, 1995. – 103 s.

98. Вараксин, А. Ю. Столкновения в потоках газа с твердыми частицами / А. Ю. Вараксин. – М. : Физматлит, 2008. – 312 с.

99. Verteilerkopf für eine pneumatische Samaschine: patent 19523841 DE, МПК6 А 01 С 7/04 / Siefken Claus; application filed by Amazonen-Werke H. Dreyer GMBH and Co. – Germany, angegeben 30.06.1995; veröffentlicht 02.11.1997.

100. Pneumatische Drillmaschine oder Samaschine mit Verteiler: patent 19717212 DE, МПК6 А 01 С 7/08, А 01 С 7/20 / Siebers Joseph; application filed by Lemken GMBH and Co. – Germany, angegeben 24.04.1997; veröffentlicht 29.10.1998.

101. Horizontally disposed apparatus for the random distribution of seeds and granular materials: patent 4717289 US, МПК4 А 01 С 15/04 / Stanley Popowich, Barry B. Barsi, James W. Henry; application filed by Ass. Morris Rod Weeder Company. – Germany, angegeben 16.01.1987; veröffentlicht 5.01.1988.

102. Пневматическая сеялка-культиватор «Сириус-10» производства ОАО «Червона зирка» // Техніка в АПК. – 2008. – № 3, 4. – С. 28–29.

103. Сентюров, А. С. Распределение семян в пневматических централизованных высевальных системах / А. С. Сентюров // Технологические основы механизации обработки почвы и посева сельскохозяйственных культур комбинированными машинами: сб. науч. тр. / Белорусская СХА. – Горки, 1987. – С. 63–68.

104. Салапура, Ю. Л. Анализ технических устройств для распределения посевного материала в пневматических высевальных системах / Ю. Л. Салапура // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб.: в 2 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2009. – Вып. 43. – Т. 1. – С. 98–104.

105. Салапура, Ю. Л. Обоснование взаимодействия рабочих органов в пневматических высевальных системах / Ю. Л. Салапура // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 20–21 ноября 2008 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеральное агентство по образованию, Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2008. – С. 96.

106. Балацко, Л. Д. Исследование процесса транспортирования семян пневматическим способом / Л. Д. Балацко // Труды ВИМ. – 1964. – Т. 34. – С. 40–68.

107. Скорляков, В. И. Обоснование параметров пневматических зерновых сеялок централизованного высева: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В. И. Скорляков. – М., 1989. – 236 с.

108. Хрусталеv, Б. М. О весовой концентрации движущейся смеси воздуха с частицами материала / Б. М. Хрусталеv // Известия вузов. Сер. Энергетика. – 1976. – № 3. – С. 145–148.

109. Гастерштадт, И. Пневматический транспорт (экспериментальное исследование) / И. Гастерштадт; под ред. П. С. Козьмина. – Л. : Изд-во Сев.-Зап. обл. промбюро ВСНХ, 1927. – 119 с.

110. Лукашевич, Н. М. Проектирование и расчет пневмотранспортных устройств и установок для грузов сельскохозяйственного производства / Н. М. Лукашевич. – Горки : БСХА, 1981. – 81 с.

111. Повх, И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / И. Л. Повх. – 3-е изд., перераб. и испр. – Л. : Машиностроение, 1974. – 480 с.

112. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Гос. изд-во физ.-матем. литературы, 1962. – 608 с.

113. Устройство для пневматического высева сыпучих материалов: пат. 8497 Респ. Беларусь, МПК А 01С 7/00 / Н. Д. Лепешкин, А. Л. Медведев, В. П. Чеботарев, Ю. Л. Салапура, Д. В. Зубенко; заявитель РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – № u 20120016; заявл. 04.01.12; опубл. 30.08.12. // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 4. – С. 174.

114. Back, O. Ventilatoren Entwurf und Berechnung / O. Back. – Кнарр, 1955. – 363 p.

115. Идельчик, И. Е. Аэродинамика технологических аппаратов: подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов / И. Е. Идельчик. – М. : Машиностроение, 1983. – 351 с.

116. Дорфман, А. Ш. Аэродинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин / А. Ш. Дорфман [и др.]; под общ. ред. И. Т. Швеца. – Киев : Изд-во АН УССР, 1960. – 188 с.

117. Семенов, А. Н. Зерновые сеялки / А. Н. Семенов. – Киев : Машгиз, 1959. – 319 с.

118. Frohlich, G. Parzellendungerstreuer mit Computersteuerung fur Exaktversuche / G. Frohlich, K.-H. Broker, H. Link // Landtechnik. – 2007. – № 3. – S. 150–151.

119. Скорляков, В. И. Исследование работы дозатора сеялки с централизованным высевом / В. И. Скорляков // Вопросы механизации растениеводства в зоне Северного Кавказа: сб. науч. тр. / ВИМ. – М., 1984. – Т. 101. – С. 127–140.

120. Лепешкин, Н. Д. О снижении потерь в пневматических высевающих системах зерновых сеялок / Н. Д. Лепешкин, А. Л. Медведев, Ю. Л. Салапура // Энергосберегающие технологии и технические средства в сельскохозяйственном производстве: доклады Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 12–13 июня 2008 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: А. В. Кузьмицкий [и др.]. – Минск, 2008. – Ч. 1. – С. 92–96.

121. Дорфман, М. Х. Пневматический транспорт зерна и продуктов его переработки / М. Х. Дорфман. – М. : Хлебоиздат, 1960. – 232 с.

122. Тимошенко, В. И. Газовая динамика высокотемпературных технологических процессов / В. И. Тимошенко. – Днепропетровск : Ин-т технической механики НАНУ НК АУ, 2003. – 460 с.

123. Александров, Н. Е. Основы теории тепловых процессов и машин: в 2 ч. / Н. Е. Александров [и др.]; под ред. Н. И. Прокопенко. – 3-е изд., испр. – М. : БИНОМ, 2009. – Ч. 1. – 560 с.

124. Лепешкин, Н. Д. Аналитическое определение пропускной способности эжекторного питателя / Н. Д. Лепешкин, А. Л. Медведев, Ю. Л. Салапура // Актуальные проблемы и перспективы развития агропромышленного комплекса: материалы Междунар. науч.-метод. конф., посвящ. 80-летию академии, Иваново, 17–18 марта 2010 г.: в 2 т. / Ивановская гос. с.-х. акад. им. Д. К. Беляева. – Иваново, 2010. – Т. 2. – С. 197–199.

125. Салапура, Ю. Л. Исследование потерь в эжекторных питателях / Ю. Л. Салапура // Молодежь и инновации–2009: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, посвящ. 170-летию УО «БГСХА», Горки, 3–5 июня 2009 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. с.-х. акад.; редкол.: А. П. Курдеко [и др.]. – Горки, 2009. – Ч. 2. – С. 127–129.

126. Лепешкин, Н. Д. Теоретические предпосылки расчета эжекторных питателей пневматических сеялок / Н. Д. Лепешкин, А. Л. Медведев, Ю. Л. Салапура // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб.: в 2 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2009. – Вып. 43. – Т. 1. – С. 105–110.

127. Лепешкин, Н. Д. Теоретические основы работы питателей эжекторного типа пневматических высевающих систем / Н. Д. Лепешкин, А. Л. Медведев, Ю. Л. Салапура // Тракторы, автомобили, мобильные энергетические средства: проблемы и перспективы развития: доклады Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 11–14 февраля 2009 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: А. В. Кузьмицкий [и др.]. – Минск, 2009. – С. 75–78.

128. Пономарев, В. М. Пневматический транспорт в строительстве : учебное пособие по курсу «Подъемно-транспортные машины» для студентов строительных факультетов специальности «Производство строительных изделий и конструкций» / В. М. Пономарев ; под ред. А. Г. Цуркона. – Калинин : КПИ, 1975. – 107 с.

129. Жуковский, Н. Е. Полное собрание сочинений: в 6 т. / Н. Е. Жуковский; под ред. А. П. Котельникова и В. П. Ветчинкина. – М., Л. : ОНТИ НКТП, 1937. – Т. 6: Винты, ветряки, вентиляторы, аэродинамическая труба. – 430 с.

130. Потураев, В. Н. Механика вибрационно-пневматических машин эжекторного типа / В. Н. Потураев [и др.]. – Киев : Наукова думка, 2001. – 176 с.

131. Лепешкин, Н. Д. Исследование конфузоров питателей эжекторного типа / Н. Д. Лепешкин, А. Л. Медведев, Ю. Л. Салапура // Научное обеспечение агропромышленного производства: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Курск, 20–22 января 2010 г.: в 3 ч. / Курская гос. с.-х. акад.; редкол.: В. А. Семькин [и др.]. – Курск, 2010. – Ч. 3. – С. 282–286.

132. Повх, И. Л. Техническая гидромеханика / И. Л. Повх. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1976. – 504 с.

133. Идельчик, И. Е. Аэродинамика потока и потери напора в диффузорах / И. Е. Идельчик // Промышленная аэродинамика: сб. научн. тр. / ЦАГИ им. проф. Н. Е. Жуковского; под ред. К. А. Ушакова. – М. : Изд. «Бюро новой техники», 1947. – № 3. – С. 132–209.

134. Лепешкин, Н. Д. Теоретические предпосылки определения параметров проточной части эжекторных питателей / Н. Д. Лепешкин [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб.: в 2 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2010. – Вып. 44. – Т. 1. – С. 89–95.

135. Медведев, А. Л. Исследование потерь в диффузорах питателей эжекторного типа / А. Л. Медведев, Ю. Л. Салапура, Н. Н. Дягель // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. 7-й Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 18–19 мая 2010 г.: в 5 ч. /

ГНУ «ВИЭСХ»; редкол.: Д. С. Стребков [и др.]. – М., 2010. – Ч. 3: Энергосберегающие технологии в животноводстве и стационарной энергетике. – С. 62–67.

136. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика: в 2 ч. / Г. Н. Абрамович. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1991. – Ч. 1. – 600 с.

137. Лепешкин, Н. Д. Оценка продольного распределения посевного материала пневматической зернотуковой сеялкой / Н. Д. Лепешкин [и др.] // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–22 октября 2009 г.: в 3 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; редкол.: П. П. Казакевич [и др.]. – Минск, 2009. – Т. 1. – С. 101–107.

138. Калинушкин, М. П. Вентиляторные установки / М. П. Калинушкин. – 7-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1979. – 223 с.

139. Внуков, И. Е. Выбор вентилятора для высевających систем зерновых пневматических сеялок / И. Е. Внуков, В. М. Гусев, Н. И. Любушко // Исследование и разработка почвообрабатывающих и посевных машин: сб. науч. стат. / ВИМ. – М., 1990. – С. 143–150.

140. Скорляков, В. И. Выбор рациональной аэродинамической схемы вентилятора для пневматических зерновых сеялок / В. И. Скорляков // Теоретические и технологические основы посева сельскохозяйственных культур: сб. науч. тр. / ВИМ. – М., 1984. – Т. 124. – С. 127–140.

141. Калинушкин, М. П. Расчет сети и подбор вентилятора с учетом влияния механических примесей к воздуху / М. П. Калинушкин // Отопление и вентиляция. – 1938. – № 8–9. – С. 13–16.

142. Корн, А. М. О силах, действующих на зерно при горизонтальном пневмотранспортировании / А. М. Корн // Труды ВИМ. – М., 1970. – Т. 46. – С. 232–283.

143. Птицын, С. Д. Зерносушилки / С. Д. Птицын. – М. : Машиностроение, 1966. – 211 с.

144. Гержой, А. П. Зерносушение / А. П. Гержой, В. Ф. Самочётов. – М. : Госиззаготовок, 1949. – 264 с.

145. Юкиш, А. Е. Справочник по оборудованию элеваторов и складов / А. Е. Юкиш, Н. И. Рыбалко, И. Е. Селицкий. – М. : Колос, 1970. – 240 с.

146. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1976. – 280 с.

147. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследованиях технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 182 с.
148. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рошин. – Л. : Колос, 1972. – 200 с.
149. Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента: при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности / В. Б. Тихомиров. – М. : Легкая индустрия, 1974. – 262 с.
150. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск : Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.
151. Ахназарова, С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1985. – 327 с.
152. Хайлис, Г. А. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Г. А. Хайлис, М. М. Ковалёв. – М. : Колос, 1994. – 169 с.
153. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта / Б. А. Доспехов. – М. : Агропромиздат, 1985. – 347 с.
154. Любушко, Н. И. Методика расчета и определения равномерности распределения семян зерновых культур по площади / Н. И. Любушко. – М. : ВИСХОМ, 1970. – 16 с.
155. Сеялки тракторные. Методы испытаний: ГОСТ 31345–2007. – Введ. 01.01.2009. – М. : Стандартинформ, 2008. – 54 с.
156. Закс, Л. Статистическое оценивание / Л. Закс; под ред. Ю. П. Адлера и В. В. Горского. – М. : Статистика, 1976. – 598 с.
157. Курзенков, С. В. Обоснование конструкции распределителя пневматической зерновой сеялки / С. В. Курзенков, И. А. Шаршуков // Вестник Белорусской ГСХА. – 2003. – № 3. – С. 70–74.
158. Ефимова, М. Р. Общая теория статистики : учебник / М. Р. Ефимова, В. М. Рябцев. – М. : Финансы и статистика, 1991. – 304 с.
159. Перевозников, В. Н. Повышение эффективности сева хлебных злаков пневмомеханическим высевающим аппаратом: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В. Н. Перевозников. – Минск, 1996. – 172 с.
160. Костюк, В. С. Статистическая оценка условий эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники / В. С. Костюк, А. В. Ленский, Е. Г. Родов // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематический сборник / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; редкол.: В. Н. Дашков [и др.]. – Минск, 2007. – Вып. 41. – С. 55–61.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Результаты натуральных испытаний по неравномерности распределения
частиц посевного материала (пшеница) экспериментальным (сеялка С-9)
и серийным (сеялка СПШ-9) распределителем

| Номер семяпровода | Масса проб (сеялка С-9), г | | | Масса проб (сеялка СПШ-9), г | | |
|-------------------|----------------------------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|
| | Повторности | | | Повторности | | |
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> | <i>7</i> |
| 1 | 360 | 352 | 348 | 360 | 253 | 378 |
| 2 | 354 | 345 | 345 | 280 | 395 | 296 |
| 3 | 341 | 351 | 346 | 254 | 301 | 275 |
| 4 | 361 | 352 | 359 | 256 | 382 | 399 |
| 5 | 369 | 336 | 340 | 217 | 396 | 290 |
| 6 | 354 | 354 | 347 | 382 | 354 | 377 |
| 7 | 345 | 343 | 338 | 345 | 303 | 338 |
| 8 | 330 | 356 | 331 | 330 | 366 | 291 |
| 9 | 344 | 359 | 344 | 344 | 289 | 344 |
| 10 | 337 | 341 | 335 | 337 | 341 | 335 |
| 11 | 342 | 355 | 358 | 342 | 355 | 358 |
| 12 | 331 | 352 | 348 | 391 | 280 | 288 |
| 13 | 352 | 353 | 328 | 322 | 393 | 389 |
| 14 | 362 | 366 | 328 | 322 | 326 | 321 |
| 15 | 346 | 343 | 339 | 326 | 343 | 342 |
| 16 | 359 | 346 | 321 | 319 | 326 | 398 |
| 17 | 332 | 338 | 342 | 332 | 338 | 255 |
| 18 | 352 | 350 | 328 | 325 | 380 | 267 |
| 19 | 327 | 352 | 325 | 327 | 382 | 396 |
| 20 | 343 | 357 | 347 | 283 | 397 | 285 |
| 21 | 332 | 367 | 356 | 392 | 387 | 276 |
| 22 | 365 | 370 | 355 | 386 | 380 | 382 |
| 23 | 359 | 331 | 326 | 399 | 301 | 340 |
| 24 | 360 | 359 | 332 | 302 | 279 | 278 |
| 25 | 367 | 335 | 340 | 287 | 305 | 399 |
| 26 | 376 | 351 | 338 | 396 | 301 | 282 |
| 27 | 379 | 363 | 366 | 279 | 393 | 391 |
| 28 | 355 | 359 | 362 | 280 | 379 | 382 |
| 29 | 365 | 396 | 351 | 395 | 396 | 385 |
| 30 | 370 | 353 | 342 | 390 | 343 | 397 |

Окончание таблицы П.1

| | | | | | | |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> | <i>7</i> |
| 31 | 345 | 343 | 345 | 305 | 283 | 337 |
| 32 | 351 | 394 | 337 | 391 | 284 | 270 |
| 33 | 359 | 367 | 367 | 309 | 327 | 385 |
| 34 | 364 | 372 | 351 | 294 | 295 | 382 |
| 35 | 358 | 362 | 375 | 388 | 280 | 339 |
| 36 | 351 | 364 | 374 | 394 | 262 | 397 |
| x_{cp} (среднее значение параметра) | 352,69 | 355,19 | 344,83 | 335,86 | 335,97 | 337,75 |
| S_M (среднее квадратическое отклонение) | 1212,1 | 1317 | 1319,8 | 4668,5 | 4549,1 | 4964,9 |
| v (коэффициент вариации) | 3,77 | 3,96 | 3,97 | 13,89 | 13,54 | 14,7 |
| v_{cp} (среднее значение коэффициента вариации) | 3,9 | | | 14,0 | | |

Таблица П.2

Результаты натуральных испытаний по неравномерности распределения частиц посевного материала (ячмень) экспериментальным (сеялка С-9) и серийным (сеялка СПШ-9) распределителем

| Номер сеяпровода | Масса проб (сеялка С-9), г | | | Масса проб (сеялка СПШ-9), г | | |
|------------------|----------------------------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|
| | Повторности | | | Повторности | | |
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> | <i>7</i> |
| 1 | 308 | 311 | 320 | 308 | 311 | 320 |
| 2 | 307 | 313 | 325 | 307 | 313 | 325 |
| 3 | 335 | 329 | 342 | 335 | 329 | 242 |
| 4 | 309 | 304 | 318 | 309 | 304 | 318 |
| 5 | 331 | 334 | 339 | 331 | 334 | 339 |
| 6 | 331 | 338 | 351 | 331 | 338 | 251 |
| 7 | 330 | 330 | 349 | 230 | 330 | 349 |
| 8 | 320 | 320 | 339 | 320 | 320 | 339 |
| 9 | 325 | 335 | 347 | 325 | 335 | 347 |
| 10 | 324 | 334 | 343 | 324 | 334 | 343 |
| 11 | 344 | 343 | 340 | 264 | 343 | 240 |

| | | | | | | |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 12 | 317 | 323 | 327 | 317 | 323 | 327 |
| 13 | 314 | 320 | 323 | 314 | 320 | 323 |
| 14 | 316 | 317 | 328 | 316 | 317 | 328 |
| 15 | 335 | 337 | 323 | 285 | 337 | 323 |
| 16 | 306 | 310 | 314 | 306 | 310 | 314 |
| 17 | 333 | 337 | 333 | 333 | 337 | 333 |
| 18 | 307 | 309 | 318 | 307 | 309 | 318 |
| 19 | 331 | 328 | 319 | 331 | 228 | 319 |
| 20 | 306 | 310 | 324 | 306 | 310 | 324 |
| 21 | 320 | 327 | 324 | 320 | 227 | 324 |
| 22 | 299 | 305 | 320 | 299 | 305 | 320 |
| 23 | 323 | 330 | 329 | 323 | 350 | 329 |
| 24 | 296 | 307 | 315 | 296 | 307 | 315 |
| 25 | 330 | 326 | 324 | 280 | 326 | 324 |
| 26 | 304 | 301 | 320 | 304 | 301 | 320 |
| 27 | 293 | 294 | 305 | 293 | 294 | 305 |
| 28 | 315 | 313 | 315 | 315 | 313 | 315 |
| 29 | 325 | 319 | 328 | 325 | 319 | 328 |
| 30 | 319 | 330 | 339 | 319 | 230 | 239 |
| 31 | 333 | 321 | 329 | 233 | 321 | 329 |
| 32 | 326 | 322 | 338 | 256 | 252 | 338 |
| 33 | 330 | 323 | 342 | 280 | 296 | 242 |
| 34 | 305 | 308 | 317 | 305 | 308 | 317 |
| 35 | 317 | 311 | 322 | 317 | 311 | 252 |
| 36 | 298 | 301 | 305 | 298 | 301 | 305 |
| $x_{\text{ср.}}$ (среднее значение параметра) | 318,4 | 320 | 327,6 | 304,5 | 309,5 | 311,8 |
| S_M (среднее квадратическое отклонение) | 1292,7 | 1241,6 | 1181,9 | 2582,2 | 3042,4 | 3224,1 |
| v (коэффициент вариации) | 4,06 | 3,88 | 3,61 | 8,48 | 9,83 | 10,34 |
| $v_{\text{ср}}$ (среднее значение коэффициента вариации) | 3,8 | | | 9,6 | | |

Таблица П.3

Результаты натурных испытаний по неравномерности распределения частиц
посевного материала (рожь) экспериментальным (сеялка С-9)
и серийным (сеялка СПШ-9) распределителем

| Номер сеяпровода | Масса проб (сеялка С-9), г | | | Масса проб (сеялка СПШ-9), г | | |
|------------------|----------------------------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|
| | Повторности | | | Повторности | | |
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> | <i>7</i> |
| 1 | 315 | 327 | 321 | 315 | 327 | 321 |
| 2 | 321 | 322 | 315 | 321 | 322 | 315 |
| 3 | 347 | 351 | 336 | 347 | 351 | 336 |
| 4 | 327 | 326 | 346 | 327 | 326 | 346 |
| 5 | 342 | 345 | 331 | 342 | 345 | 331 |
| 6 | 356 | 356 | 348 | 356 | 356 | 348 |
| 7 | 346 | 348 | 324 | 346 | 348 | 324 |
| 8 | 329 | 327 | 326 | 329 | 327 | 326 |
| 9 | 353 | 345 | 351 | 353 | 345 | 351 |
| 10 | 332 | 328 | 340 | 332 | 328 | 340 |
| 11 | 350 | 358 | 357 | 350 | 358 | 357 |
| 12 | 325 | 330 | 333 | 325 | 330 | 333 |
| 13 | 326 | 322 | 330 | 326 | 322 | 330 |
| 14 | 324 | 331 | 338 | 324 | 331 | 338 |
| 15 | 351 | 352 | 340 | 351 | 352 | 340 |
| 16 | 313 | 320 | 327 | 313 | 320 | 327 |
| 17 | 345 | 342 | 350 | 345 | 342 | 350 |
| 18 | 316 | 314 | 323 | 316 | 314 | 323 |
| 19 | 343 | 344 | 337 | 343 | 344 | 337 |
| 20 | 312 | 314 | 321 | 312 | 314 | 321 |
| 21 | 335 | 341 | 338 | 235 | 341 | 338 |
| 22 | 318 | 317 | 314 | 318 | 317 | 314 |
| 23 | 336 | 338 | 344 | 336 | 238 | 244 |
| 24 | 309 | 307 | 315 | 309 | 307 | 315 |
| 25 | 338 | 337 | 347 | 238 | 337 | 247 |
| 26 | 305 | 313 | 318 | 305 | 313 | 318 |
| 27 | 291 | 300 | 295 | 291 | 300 | 295 |
| 28 | 322 | 321 | 336 | 322 | 321 | 336 |
| 29 | 332 | 330 | 337 | 332 | 330 | 337 |
| 30 | 337 | 338 | 347 | 337 | 238 | 287 |
| 31 | 345 | 339 | 344 | 345 | 239 | 344 |

Окончание таблицы П.3

| | | | | | | |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <i>l</i> | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 32 | 345 | 349 | 345 | 345 | 349 | 345 |
| 33 | 333 | 331 | 339 | 233 | 231 | 339 |
| 34 | 308 | 314 | 318 | 308 | 314 | 318 |
| 35 | 323 | 323 | 328 | 223 | 223 | 228 |
| 36 | 307 | 301 | 303 | 307 | 301 | 303 |
| $x_{\text{ср.}}$ (среднее значение параметра) | 329,4 | 330,6 | 332,3 | 318,3 | 316,7 | 322,3 |
| S_M (среднее квадратическое отклонение) | 1587,7 | 1524,1 | 1412,3 | 3466,3 | 3702,2 | 2965,2 |
| v (коэффициент вариации) | 4,82 | 4,61 | 4,25 | 10,89 | 11,69 | 9,2 |
| $v_{\text{ср}}$ (среднее значение коэффициента вариации) | 4,5 | | | 10,6 | | |

Таблица П.4

Результаты натурных испытаний по неравномерности распределения частиц посевного материала (горох) экспериментальным (сеялка С-9) и серийным (сеялка СПШ-9) распределителем

| Номер семяпровода | Масса проб (сеялка С-9), г | | | Масса проб (сеялка СПШ-9), г | | |
|-------------------|----------------------------|-----|-----|------------------------------|-----|-----|
| | Повторности | | | Повторности | | |
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| <i>l</i> | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 349 | 315 | 337 | 449 | 315 | 337 |
| 2 | 342 | 333 | 330 | 342 | 333 | 330 |
| 3 | 392 | 408 | 367 | 432 | 408 | 367 |
| 4 | 381 | 357 | 344 | 381 | 357 | 344 |
| 5 | 397 | 378 | 380 | 397 | 378 | 380 |
| 6 | 374 | 403 | 387 | 442 | 403 | 387 |
| 7 | 406 | 383 | 366 | 406 | 383 | 366 |
| 8 | 387 | 378 | 380 | 387 | 378 | 380 |
| 9 | 390 | 353 | 380 | 390 | 353 | 380 |
| 10 | 380 | 375 | 369 | 380 | 375 | 369 |
| 11 | 380 | 375 | 376 | 380 | 375 | 376 |
| 12 | 337 | 319 | 322 | 337 | 219 | 322 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 13 | 339 | 336 | 326 | 339 | 336 | 326 |
| 14 | 359 | 342 | 338 | 359 | 342 | 338 |
| 15 | 370 | 365 | 345 | 370 | 365 | 345 |
| 16 | 342 | 377 | 365 | 342 | 377 | 365 |
| 17 | 372 | 368 | 354 | 372 | 368 | 354 |
| 18 | 370 | 362 | 353 | 370 | 362 | 353 |
| 19 | 367 | 357 | 353 | 367 | 357 | 353 |
| 20 | 350 | 364 | 347 | 350 | 404 | 247 |
| 21 | 371 | 356 | 357 | 371 | 256 | 357 |
| 22 | 343 | 360 | 367 | 343 | 360 | 367 |
| 23 | 376 | 362 | 349 | 376 | 362 | 249 |
| 24 | 329 | 350 | 354 | 229 | 350 | 354 |
| 25 | 371 | 371 | 371 | 371 | 371 | 371 |
| 26 | 342 | 335 | 346 | 442 | 235 | 346 |
| 27 | 341 | 326 | 3229 | 241 | 226 | 229 |
| 28 | 348 | 345 | 334 | 248 | 345 | 234 |
| 29 | 391 | 367 | 3622 | 291 | 367 | 362 |
| 30 | 374 | 378 | 398 | 411 | 378 | 398 |
| 31 | 408 | 402 | 389 | 408 | 402 | 389 |
| 32 | 396 | 388 | 406 | 396 | 388 | 406 |
| 33 | 384 | 377 | 381 | 384 | 377 | 381 |
| 34 | 356 | 347 | 335 | 256 | 247 | 235 |
| 35 | 400 | 355 | 369 | 448 | 355 | 369 |
| 36 | 345 | 348 | 337 | 245 | 248 | 237 |
| x_{cp} (среднее значение параметра) | 368,3 | 361,5 | 358,4 | 362,6 | 345,97 | 341,8 |
| S_M (среднее квадратическое отклонение) | 2209,8 | 2223,3 | 2125,3 | 5924,9 | 5293,3 | 5065,4 |
| v (коэффициент вариации) | 6,0 | 6,15 | 5,93 | 16,34 | 15,3 | 14,82 |
| v_{cp} (среднее значение коэффициента вариации) | 6,0 | | | 15,5 | | |

Таблица П.5

Оценка существенности средней разности неравномерности распределения посевного материала по сошникам между экспериментальным (сеялка С-9) и серийным (сеялка СПШ-9) распределителем

| Наименование показателя | Наименование культуры | | | | | | | |
|--|--|------------------|--|-----------------|--|------------------|--|-------------------|
| | Пшеница | | Ячмень | | Рожь | | Горох | |
| | С-9 | СПШ-9 | С-9 | СПШ-9 | С-9 | СПШ-9 | С-9 | СПШ-9 |
| Среднее значение, \bar{x} | 350,9 | 336,5 | 322 | 308,6 | 330,7 | 319,1 | 362,8 | 350,1 |
| Сумма квадратов отклонений от среднего, $\sum (x_i - \bar{x})^2$ | 21781,1 | 234926,9 | 17884 | 93111,9 | 24060,7 | 121387,4 | 52040,3 | 319213,1 |
| Абсолютная ошибка средней, $S_{\bar{x}}$ | 1,37 | 4,5 | 1,24 | 2,8 | 1,44 | 3,24 | 2,1 | 5,3 |
| Относительная ошибка средней, $S_{\bar{x}} \text{ отн. } \%$ | 0,39 | 1,34 | 0,39 | 0,9 | 0,44 | 1,02 | 0,58 | 1,5 |
| Доверительный интервал $\bar{x} \pm t_{05} \cdot S_{\bar{x}}$ | 350,9 \pm 2,69 | 336,5 \pm 8,82 | 322 \pm 2,4 | 308,6 \pm 5,5 | 330,7 \pm 2,8 | 319,1 \pm 6,35 | 362,8 \pm 4,12 | 350,1 \pm 10,39 |
| Критерий существенности, t | Условие: $t_{\phi} > t_{05}$ | | Условие: $t_{\phi} > t_{05}$ | | Условие: $t_{\phi} > t_{05}$ | | Условие: $t_{\phi} > t_{05}$ | |
| | t_{ϕ} | t_{05} | t_{ϕ} | t_{05} | t_{ϕ} | t_{05} | t_{ϕ} | t_{05} |
| | 3,06 | 1,96 | 4,37 | 1,96 | 3,3 | 1,96 | 2,2 | 1,96 |
| | Вывод: <i>различие значимо</i> | | Вывод: <i>различие значимо</i> | | Вывод: <i>различие значимо</i> | | Вывод: <i>различие значимо</i> | |

Научное издание

Чеботарев Валерий Петрович, **Лепешкин** Николай Данилович,
Салапура Юрий Леонтьевич и др.

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ВЫСЕВАЮЩИЕ СИСТЕМЫ
ПОСЕВНЫХ МАШИН:
ТЕОРИЯ, РАСЧЕТ, ЭКСПЕРИМЕНТ

Ответственный за выпуск *И. С. Крук*
Редактор *Т. В. Каркоцкая*
Компьютерная верстка *Д. А. Значёнок*
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 19.12.2019. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 13,02. Уч.-изд. л. 10,18. Тираж 100 экз. Заказ 721.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.