

*ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АГРОИНЖЕНЕРНАЯ АКАДЕМИЯ»*

В.П. Забродин, А.М. Бондаренко, И.Г. Пономаренко

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ВНЕСЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ
В СИСТЕМАХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ**

Ростов-на-Дону
«Терра»
2008

УДК 631.333:631.82-52

*Печатается по решению Ученого Совета
ФГОУ ВПО «Азово-Черноморская государственная
агроинженерная академия» (протокол №8 от 1 ноября 2007 г.)*

Рецензенты:

Тарасенко А.П. – доктор технических наук профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ. Воронежский государственный аграрный университет.

Вялков В.И. – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-технологического института механизации и электрификации сельского хозяйства.

Забродин В.П., Бондаренко А.М., Пономаренко И.Г.

Технологические процессы внесения минеральных удобрений в системах точного земледелия. – Ростов н/Д: ООО «Терра»; НПК «Гефест», 2007 – 150 с.: илл.

В работе выполнен анализ методов и технических средств определения почвенного плодородия, процессов распределения минеральных удобрений по поверхности поля центробежно-дисковыми и спирально-шнековыми аппаратами, применительно к технологиям точного земледелия.

Рассчитана на специалистов, занимающихся разработкой и совершенствованием рабочих органов и систем управления технологическими процессами машин для посева и внесения минеральных удобрений, а также может быть полезна студентам агроинженерных специальностей.

© ФГОУ ВПО «Азово-Черноморская государственная
агроинженерная академия», 2008
© Забродин В.П., Бондаренко А.М., Пономаренко И.Г., 2008

ВВЕДЕНИЕ

Производство продуктов питания является актуальной мировой проблемой, так как потребление продуктов питания на душу населения отстает от требований медицинских норм. Рост народонаселения планеты требует производства дополнительной сельскохозяйственной продукции.

Увеличение производства продуктов питания за счет вовлечения в земледелие новых площадей является ограниченным и дорогостоящим способом, наносящим порой значительный вред экологии планеты. Основным путем увеличения объемов производства продуктов питания является более интенсивное использование уже освоенных земель.

Важным путем в решении проблемы питания является возделывание высокоурожайных сельскохозяйственных культур и рациональное использование уже освоенных площадей. При возделывании сельскохозяйственных культур с продуктами питания из почвы выносятся питательные элементы, что приводит к снижению их плодородия. Повышение плодородия почв обеспечивается рациональным ведением сельского хозяйства и широким применением органических и минеральных удобрений.

Дезинтеграционные процессы и кризисные явления в сельском хозяйстве привели к резкому сокращению животноводческих ферм и комплексов и, как следствие, снизили объемы внесения органических удобрений. В этих условиях роль минеральных удобрений в обеспечении почв питательными элементами возрастает. Несоизмеримо высокие закупочные цены на минеральные удобрения привели к сокращению объемов их производства и поставок. В этих условиях работы исследовательских центров и проектных организаций, занимающихся вопросами разработки и проектирования машин для внесения минеральных удобрений, должны быть направлены на более эффективное использование удобрений и повышение их окупаемости. Основой повышения эффективности использования минеральных удобрений является дифференцированное их применение в зависимости от неоднородности почвенного плодородия. Так, если при внесении средней дозы питательных элементов в обычных технологиях 1 кг действующего вещества дает прибавку урожая до 4 кг зерна, то дифференцированное внесение – более 8 кг, при этом экономится до 30...35% минеральных удобрений.

В решении данной проблемы важное место отводится точным технологиям и дифференцированному внесению удобрений, реализуемыми автоматизированными техническими средствами.

Так как завершающей операцией технологического процесса применения минеральных удобрений является их распределение по полю, то качественные и количественные показатели работы машин для внесения удобрений характеризуют эффективность всего процесса.

Основным показателем функционирования средств механизированного внесения минеральных удобрений является равномерность распределения питательных веществ по поверхности поля. Если при внесении односторонних или сложных удобрений качество функционирования машин оценивается по равномерности распределения частиц, то при внесении туковых смесей качественные показатели зависят от распределения по поверхности поля частиц каждого из компонентов смеси.

Отклонение дозы и равномерности распределения компонентов от агротехнической нормы приводит к снижению урожайности или к накоплению в продуктах питания вредных веществ. Некачественное выполнение технологического процесса следует рассматривать как технологический брак или отказ системы.

Сложность решения данной проблемы заключается в материале – минеральных удобрениях и их смесях. Это обусловлено тем, что физико-механические свойства минеральных удобрений значительно различаются в зависимости от вида удобрений или состава тукосмеси. Кроме того, минеральные удобрения и, особенно, их смеси являются гигроскопичными материалами. Это является причиной их высокой чувствительности к изменениям внешних условий. Нестабильность физико-механических свойств материала приводит к отклонениям выходных параметров от оптимальных значений.

Важным условием создания точных технологий, кроме отмеченного, является разработка методов для объективной оценки обеспеченности почв питательными элементами и устройств для контроля и управления технологическими процессами.

Исследовательскими и проектными организациями накоплен большой практический опыт и научный материал по изучению и описанию технологического процесса внесения минеральных удобрений.

Однако большая часть работ выполнена без учета состава минеральных удобрений и их смесей, технические решения направлены на контроль и управление некоторыми параметрами машин и не охватывает основной фазы технологического процесса – распределения минеральных удобрений по поверхности поля.

1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВНЕСЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

1.1. Роль минеральных удобрений в реализации биологического потенциала растений

Основатель отечественной агрохимической науки Д.Н. Прянишников представлял систему земледелия в виде треугольника, по вершинам которого расположены основные объекты агрохимии – растения, почва и удобрения, взаимодействующие друг с другом.

Основным средством вмешательства в круговорот веществ является применение удобрений. Важную роль в обеспечении растений питательными элементами играют минеральные удобрения. Учитывая, что растениям одновременно требуются все питательные элементы, а содержание их в почве обычно не соответствует требуемым дозам, то возникает необходимость адаптивного внесения удобрений с учетом требований культур и содержания в почве питательных элементов. Эффективность применения удобрений зависит от почвенно-климатических условий; водного режима и степени окультуренности почв; наличия в них питательных веществ в усвояемой форме; биологических особенностей возделываемых культур; уровня агротехники и общей культуры земледелия; сроков, способов и доз внесения удобрений; форм минеральных удобрений и соотношения в них элементов питания; качества вносимых удобрений.

Проанализируем влияние этих факторов более подробно, рассматривая систему “почва – растение – минеральные удобрения”, как агрохимическую систему, в её функциональных связях (рис. 1.1).

Входящие в систему объекты агрохимии “минеральные удобрения – почва – растение” характеризуется наличием прямых и обратных связей.

Минеральные удобрения, способствуя реализации потенциальных возможностей возделываемых культур, через растение оказывают влияние на почву. Это влияние проявляется в увеличении биологической массы и корневых остатков, которые после переработки микроорганизмами сами являются удобрениями. Кроме того, ряд сельскохозяйственных культур сами способны накапливать питательные элементы на корневой системе (например, бобовые культуры).

Факторы, влияющие на функционирование системы “минеральные удобрения – почва – растение”, условно разделены на три группы. К первой группе отнесены факторы, определяющиеся климатическими условиями и системами земледелия (богарное или орошаемое).

**Функциональная схема системы
“почва – растение – минеральные удобрения”**

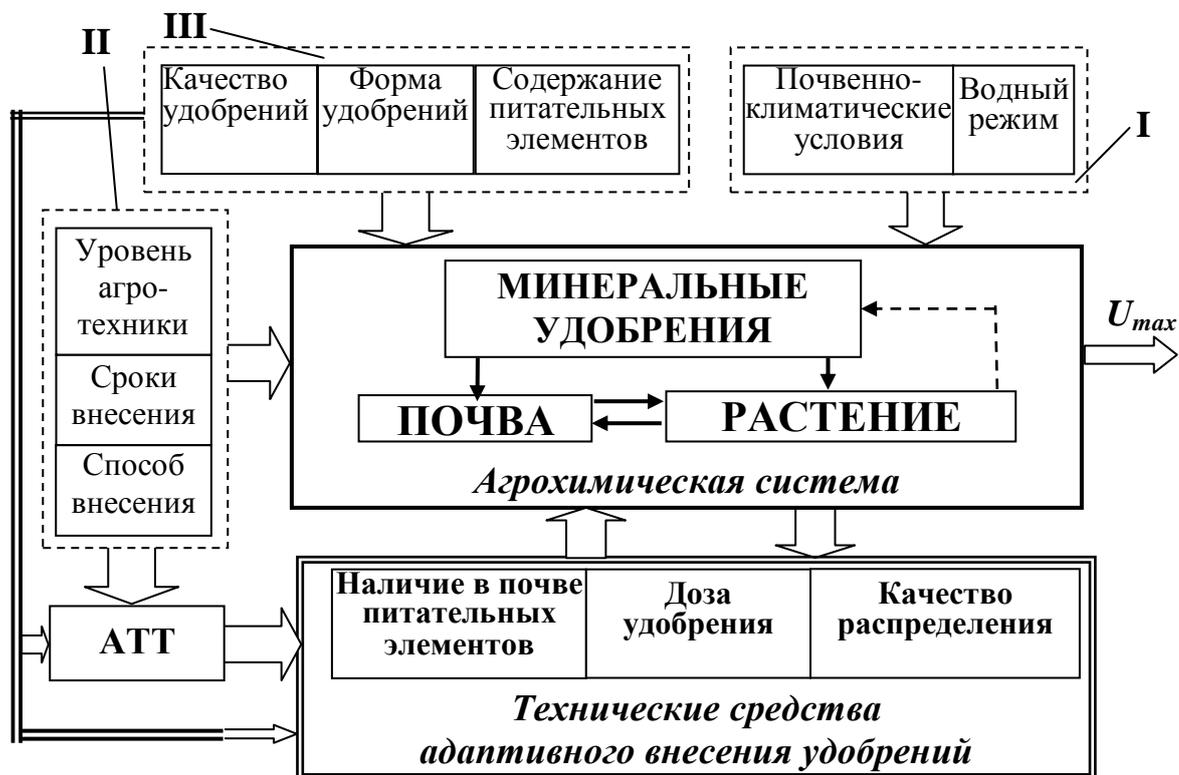


Рис. 1.1.

Ко второй группе относятся агротехнические факторы, определяющие организацию производства продукции растениеводства – уровень агротехники, определение сроков и способов внесения удобрений. На основе факторов этой группы формируются агротехнические требования (АТТ) к средствам механизации.

III группа факторов характеризует влияние форм, видов и качества подготовки минеральных удобрений на функционирование рассматриваемой системы. Эта группа факторов является определяющей при разработке технологических схем и рабочих органов средств механизированного внесения минеральных удобрений.

Для реализации потенциальных возможностей возделываемых культур при функционировании технических средств в условиях неоднородного почвенного плодородия почв машины должны выполнять следующие функции:

- определять содержание питательных веществ в почве при движении машины по полю;
- вычислять требуемые дозы питательных элементов и обеспечивать их дозирование;
- обеспечивать качественное распределение питательных элементов по полю.

Технические средства, реализующие этих функций, обеспечивают адаптацию технологического процесса внесения минеральных удобрений к видам минерального питания растений.

Почвенно-климатические условия возделывания сельскохозяйственных культур и водный режим относятся к факторам первой группы и определяются зоной возделывания культур.

Климат южной степной зоны в основном умеренно-континентальный, характеризующийся большим притоком солнечной энергии и длительным вегетационным периодом (200-220 дней). Среднегодовое количество осадков неравномерно как по зонам, так и по годам. В засушливые годы количество осадков в восточных районах Ростовской области и Ставропольского края составляет всего 200-300 мм, а во влажные годы достигает 600-750 мм, что вызывает значительное колебание эффективности применения минеральных удобрений.

Эффективность применения удобрений зависит от состава и доз вносимых питательных элементов. Прибавка урожая озимой пшеницы при внесении одного питательного элемента (N_{40}) составила 1,6-4,9 ц/га, а при внесении трехкомпонентной смеси ($N_{40}P_{60}K_{40}$) – 7,8-10,4 ц/га.

В благоприятных погодных условиях на выщелоченных черноземах (Южный федеральный округ) прибавка урожая составляет 10,4 кг зерна озимой пшеницы на 1 кг действующего вещества NPK, на карбонатных, предкавказских и приазовских черноземах она составляет 5,3 кг. В Поволжской зоне на обыкновенных черноземах прибавка урожая достигает 4,8 кг зерна на 1 кг действующего вещества NPK.

Роль минеральных удобрений в Нечерноземной зоне имеет особое значение. На бедных подзолистых малоплодородных почвах без применения удобрений невозможно получение высоких и устойчивых урожаев. Такие почвы в России составляют около 20% пашни. В данной зоне на посевах зерновых культур прибавка урожая на 1 кг действующего вещества NPK составляет от 4,8 до 6,0 кг зерна в зависимости от возделываемых культур. Данные ВИУА показывают, что прибавка урожая от полной дозы NPK на 2,7 кг выше, чем при внесении только азотных удобрений. Аналогичные результаты получены и по другим почвенно-климатическим зонам. Во всех зонах эффективность внесения полной дозы выше, чем при внесении одного или двух питательных элементов.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что адаптированное внесение минеральных удобрений является эффективным способом получения высоких и устойчивых урожаев.

Влияние водного режима на эффективность применения минеральных удобрений хорошо заметно на орошаемых участках. По данным ВИУА при внесении полной дозы NPK (90...120 кг действующего вещества на 1 га) прибавка урожая составила от 35% на посевах яровой пшеницы, до 191% на посевах риса в большинстве почвенно-климатических зон.

Рассмотрим влияние факторов II группы. Эффективность внесения минеральных удобрений в значительной степени зависит от окультуренности почв и наличия в них питательных элементов в усвояемой форме. Наиболее эффективно применение удобрений на хорошо ухоженных почвах по пару. Почвы, подверженные ветровой и водной эрозии обладают низким плодородием. На таких почвах урожаи зерновых на 20...70% ниже, чем на почвах, не подверженных эрозии. Повышение урожаев может быть достигнуто за счет применения удобрений в сочетании с комплексом противоэрозийных мероприятий.

Влияние доз питательных элементов на урожайность сельскохозяйственных культур характеризуется функциями отзывчивости растений. Анализ этих функций показывает, что с ростом доз фосфорных и калийных удобрений урожайность повышается (рис. 1.2). На эффективность применения азотных удобрений оказывает влияние содержание в почве питательных элементов в усвояемой форме. Избыток азота приводит к потерям урожая и



Рис. 1.2

накоплению в продуктах питания нитратов, а недостаток азота приводит к недобору урожая и снижению эффективности применения удобрений. Как первое, так и второе нежелательно. Поэтому важным звеном в повышении урожайности и качества сельскохозяйственной продукции является определение требуемой дозы каждого питательного элемента.

Результаты агрохимического обследования почв позволяют правильно выбрать необходимые питательные элементы и их дозы с учетом возделываемых культур и почвенно-климатических условий.

Сравнение традиционных технологий (распределение средней для данного поля дозы питательных элементов) с дифференцированным внесением (дробление по срокам и дозам) полной дозы минерального питания растений, показывает высокую агрономическую и экономическую эффективность дифференцированного внесения.

По данным ВИУА окупаемость 1 кг азотных удобрений составила 11 кг зерна при традиционной технологии и 16,7 кг – при дифференцированном внесении. Прибавка урожая и экономическая эффективность возросли в 1,52 раза.

Недостаток технологий, основанных на внесении средней дозы питательных элементов, заключается в том, что из-за пестроты плодородия в пределах поля на одни участки вносится избыточное количество питатель-

ных элементов, а на другие – недостаточное. В первом случае наблюдается перерасход удобрений, а во втором случае – недобор урожая. Влияние неоднородности плодородия поля на экономическую эффективность дифференцированного внесения минеральных удобрений приведено в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Экономическая эффективность дифференцированного внесения минеральных удобрений с учетом неоднородности поля

Вид удобрений	Дозы N, P, K при среднем содержании питательных элементов в почве, кг/га		
	30	60	90
	Суммарные издержки от повышения или занижения доз удобрений от среднего (руб./га), %		
Аммиачная селитра	315,0	598,9	659,7
	22,0%	30,6%	32,7%
Суперфосфат двойной	190,7	505,2	725,9
	28,6%	38,2%	39,0%
Калий хлористый	113,7	265,4	324,3
	23,5%	31,9%	33,4%

Анализ таблицы 1.1. показывает, что при дифференцированном внесении удобрений суммарные издержки от повышения или занижения доз могут достигать (22...39)% от общих затрат.

Р.А. Афанасьев отмечает, что эффективность технологий дифференцированного внесения основывается на трех последовательных методологических принципах:

- идентификация (агрохимическое картографирование) внутривольных контуров почвенного плодородия;

- расчет оптимальных доз удобрений для каждого контура в соответствии с агрохимической картограммой поля и требованиями культуры севооборота;

- поконтурное внесение расчетных доз удобрений специальными машинами в автоматизированном режиме их работы.

Решение проблемы дифференцированного внесения минеральных удобрений невозможно без создания технических средств, обеспечивающих адаптированное по дозам и видам внесение питательных элементов.

Выбор способа внесения минеральных удобрений определяется с учетом структуры посевов, планируемого урожая, особенностей культур, свойств почвы и удобрений, наличия средств механизированного внесения.

Для достижения максимальной эффективности внесения минеральных удобрений технические средства должны удовлетворять агротехническим требованиям (АТТ). Применяемые технические средства выполняют внесение простых сложных и смешанных удобрений: до посева – основное (поверхностное); при посеве – локальное (в рядки или гнезда); в период вегета-

ции – подкормка. Внесение нескольких видов минеральных удобрений на одну и ту же площадь осуществляется разными способами. Основное внесение нескольких питательных веществ по традиционным технологиям осуществляется путем:

- последовательного внесения однокомпонентных удобрений;
- внесения сложного удобрения;
- внесения предварительно приготовленной туковой смеси.

Результаты исследований доказывают высокую экономическую эффективность применения туковых смесей по сравнению с отдельным внесением компонентов и близкую по эффективности при внесении сложных удобрений.

Мировое потребление минеральных удобрений и их смесей показывает высокую эффективность последних. Так в США по разным зонам и видам возделываемых культур эффективность применения смесей минеральных удобрений составила 2,5...7,3 долл. на один долл. затрат.

Основную часть минеральных удобрений в США применяют в смешанном виде. Уже в 1880 году доля смешанных удобрений составляла 75% от общего потребления, а с 1968 года их доля держится на уровне (51-52)%.

Сухие тукосмеси приготавливаются на заводах небольшой производительности (0,5...2,0 тыс. т.) которые обслуживают хозяйства в радиусе (12...40) км. Тукосмеси доставляются в поле навалом (балк-блендинг). Число марок приготавливаемых смесей достигает нескольких тысяч и определяется обеспеченностью почв питательными элементами в усвояемой форме, видами возделываемых культур, климатическими условиями, способами внесения и рядом других факторов. Для приготовления тукосмесей используют односторонние и сложные удобрения высокого качества с выровненными гранулометрическими характеристиками.

Рассматривая, мировой уровень производства и потребления минеральных удобрений и их смесей, можно заметить тенденцию увеличения объемов производства и доз внесения питательных веществ. Однако, как показывают расчеты, при сохранении существующих темпов производства и потребления удобрений, вынос питательных веществ из почвы в 2000 году покрывался лишь на 47%. Это указывает на необходимость увеличения объемов производства минеральных удобрений и повышения эффективности их использования.

1.2. Физико-механические свойства минеральных удобрений и их смесей

На разработку и функционирование технических средств для применения минеральных удобрений значительное влияние оказывают факторы III группы – физико-механические свойства минеральных удобрений и их смесей. Успешное решение проблемы применения минеральных удобрений и,

особенно, туковых смесей требует учета целого ряда факторов связанных как с процессами приготовления, так транспортировки и внесения. Удобрения, составляющие тукосмесь, должны обладать хорошей сыпучестью и не терять питательные вещества при хранении, транспортировке и внесении.

При приготовлении тукосмесей необходимо учитывать химическое взаимодействие компонентов. В большинстве случаев в туковых смесях происходят реакции обменного разложения. На скорость химических реакций влияют вид односторонних удобрений, гигроскопичность, влажность, кислотность или щелочность. Удобрения, содержащие свободную кислоту или обладающие щелочной реакцией, активно взаимодействуют между собой. Так при смешивании аммиачной селитры с суперфосфатом, особенно порошковидным, смесь превращается в липкую массу из-за образования более гигроскопичной кальциевой селитры. Смеси, приготовленные на основе мочевины (карбонида) при хранении сильно увлажняются и становятся непригодными для механизированного посева, при этом происходит потеря питательных веществ.

Получение качественной тукосмеси может быть достигнуто при правильном подборе компонентов смеси и использовании удобрений с определенными физическими свойствами. Рекомендуемые к смешиванию виды минеральных удобрений приведены в таблице 1.2.

Изучение влияния температуры и относительной влажности на содержание влаги в туковых смесях, приготовленных на основе аммиачной селитры и мочевины, показало, что смеси на аммиачной селитре увлажняются сильнее, чем на мочевины.

Таблица 1.2. Допустимость смешивания минеральных удобрений

№	Удобрение	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Сульфат аммония	Х	Н	У	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	М
2	Аммиачная селитра	Н	Х	Н	У	Н	У	У	У	У	М	М	М
3	Карбонид	У	Н	Х	У	Н	У	У	У	У	М	М	М
4	Аммофос	Н	У	У	Х	Н	Н	Н	У	У	М	М	М
5	Нитрофос	Н	Н	Н	Н	Х	Н	Н	У	У	У	У	У
6	Нитроаммофос	Н	У	У	Н	Н	Х	Н	У	У	У	У	У
7	Диаммонийфосфат	Н	У	У	Н	Н	Н	Х	У	М	М	М	М
8	Суперфосфат простой	Н	У	У	У	У	У	У	Х	М	М	М	М
9	Суперфосфат двойной	Н	У	У	У	У	У	М	М	Х	М	М	М
10	Калийная соль	Н	М	М	М	У	У	М	М	М	Х	М	М
11	Хлористый калий	Н	М	М	М	У	У	М	М	М	М	Х	М
12	Сульфат калия	М	М	М	М	У	У	М	М	М	М	М	Х

Условные обозначения: **М** - можно смешивать; **Н** – нельзя смешивать; **У** – допускается приготовление смеси перед внесением.

Причиной ухудшения физико-механических свойств тукосмесей является способность компонентов вступать в химические реакции. Скорость химического взаимодействия возрастает с повышением температуры и влажности воздуха.

Нельзя смешивать аммиачные формы азотных удобрений, обладающих активными щелочными свойствами с калийными удобрениями, содержащими калий в карбонатной форме, так как при этом происходят потери азота в виде аммиака. Уменьшение скорости химических реакций и придание туковым смесям удовлетворительных физико-механических свойств обеспечивается применением нейтрализующих добавок и схем смешивания компонентов.

Анализ свойств тукосмесей в зависимости от используемых компонентов, условий хранения, температуры и влажности воздуха и ряда других факторов показывают, что для повышения качественных показателей процесса распределения удобрений в почве желательнее максимально сокращать время от процесса приготовления до внесения на поле.

Важным фактором, влияющим на качество внесения смесей, является возможность их расслоения при перегрузках, транспортировке и внесении.

На ход и качественные показатели процесса смешивания влияют конструктивные и технологические параметры смесителя, а так же физико-механические свойства смешиваемых материалов. Наибольшее влияние оказывают гранулометрические, аэродинамические и фрикционные характеристики, влажность, сыпучесть и слеживаемость минеральных удобрений. Многие из указанных характеристик тесно связаны между собой.

Гранулометрический (механический) состав (таблица 1.3), по мнению ряда исследователей, является наиболее важной характеристикой удобрений, влияющей на создание и применение туковых смесей, их расслоение.

Расслоение туковых смесей на этапах от приготовления смесей до доставки её в поле зависит от соотношения размерных групп компонентов. Неоднородность смеси возрастает при увеличении процентного содержания гранул одной из размерных групп. По данным ВНИИМССХ наилучшее качество смеси сохраняется при использовании частиц с равным процентным содержанием фракций (1...2) мм и (2...3) мм. Так, при равном процентном содержании гранул указанных размерных групп, неоднородность смеси составила 5,9%, а при преобладании фракции 1...2 мм до 90% неоднородность смеси увеличилась более чем в пять раз и составила 29,6%.

Анализ литературы и результаты наших исследований показывают, что удобрения, применяемые для приготовления туковых смесей, содержат от 4,7 до 83,1% частиц размером (1...3) мм. Для выделения частиц требуемых размерных групп необходимо введение в технологический процесс дополнительной операции и может быть оправдано при небольших объёмах работ. Частицы удобрений, непригодные к смешиванию, необходимо будет измельчать или вносить без смешивания. Кроме того, тукосмесь, приготовленная из

частиц с заданными размерами, после взаимодействия с рабочими органами машин изменит свои гранулометрические характеристики.

Таблица 1.3. Гранулометрический состав некоторых минеральных удобрений, %

Удобрение	Размер фракции, мм							
	>7	7-5	5-3	3-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25 <
Суперфосфат: порошковидный гранулированный	6,1	6,2	10,6	8,7	9,8	18,1	21,0	20,5
двойной	-	2,0	38,0	36,0	16,0	5,0	2,0	1,0
Аммиачная селитра	-	0,8	3,7	11,5	50,0	34,0	-	-
Калийная соль	15,0	6,0	8,0	8,0	6,0	52,0	5,0	-
Хлористый калий	-	2,2	8,6	9,7	5,5	29,3	25,7	19,0

Необходимость измельчения туковых смесей обусловлена склонностью их к слёживанию. Причем процесс слёживания наиболее интенсивно протекает в первые 1...3 дня после приготовления тукосмеси.

Выравненность компонентов туковых смесей по гранулометрическим характеристикам не является достаточным условием качественного распределения частиц по поверхности поля, так как при взаимодействии частиц с рабочими поверхностями машин на процесс расслоения существенное влияние оказывают фрикционные, аэродинамические и другие характеристики.

Таблица 1.4. Коэффициенты трения скольжения минеральных удобрений и их смесей

Удобрения	Поверхность трения			
	Сталь	Дерево	Резина	Полиэтилен
Аммиачная селитра	0,66	0,73	0,69	0,49
Карбамид	0,64	0,54	0,81	0,31
Суперфосфат: гранулированный	0,55	0,54	0,58	0,43
двойной гранулированный	0,47	0,56	0,57	0,42
Хлористый калий	0,51	0,47	0,64	0,35
Аммофос	0,48	0,62	0,62	0,43
Нитрофоска	0,42	0,49	0,56	0,30
Двойная туковая смесь (суперфосфат + карбамид)	0,56	0,50	0,56	0,41
Тройная туковая смесь (Суперфосфат + Карбамид + калий в виде поташа)	0,58	0,63	0,65	0,49

Фрикционные характеристики минеральных удобрений (таблица 1.4) и их смесей оцениваются коэффициентами внутреннего и внешнего трения. Коэффициент внутреннего трения характеризует сопротивление материала сдвигу частиц относительно друг друга, а коэффициент внешнего трения скольжения характеризует сопротивление сдвигу относительно поверхности рабочих органов машин.

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что коэффициенты внешнего трения частиц удобрений одного вида варьируют в широких пределах. Коэффициент вариации углов трения составляет от 6,4 до 23,4% для разных видов минеральных удобрений.

На работу бросковых аппаратов (центробежных, ленточных, пневматических и др.) оказывают влияние аэродинамические характеристики частиц. Результаты испытаний показывают, что коэффициенты парусности частиц минеральных удобрений изменяются в широких пределах от 1,17 до 0,13. Следовательно, задача подбора компонентов для смесей минеральных удобрений с близкими коэффициентами парусности весьма затруднена.

1.3. Взаимодействие технических средств и агрохимической системы

Выполненный анализ физико-механических свойств минеральных удобрений и их смесей позволяет выявить общие и отличительные признаки, присущие удобрениям одного химического состава и механически приготовленным туковым смесям (рис. 1.3).

Частицы одного вида удобрений различаются размерами и формой, коэффициентами внешнего и внутреннего трения, плотностью и коэффициентами парусности и по ряду других признаков, то есть обладают свойствами туковых смесей и, следовательно, они также склонны к расслоению.

Агротехническая эффективность функционирования технических средств регламентируется агротехническими требованиями (АТТ), разрабатываемыми на основе анализа факторов II и III групп для разных природно-климатических зон, систем земледелия и способов внесения.

Со стороны агрохимической системы “минеральные удобрения – почва – растение” к техническим средствам адаптивного внесения минеральных удобрений предъявляются следующие требования:

**Физико-механические свойства
минеральных удобрений и их смесей**



Рис. 1.3

1) для реализации потенциальных возможностей сельскохозяйственных культур (получения максимального урожая U_{max}) технические средства должны обеспечивать качественное внесение требуемых доз питательных элементов с учетом неоднородности почвенного плодородия;

2) при неоднородности почвенного плодородия с учетом биологических особенностей культур технические средства должны обеспечивать одновременное внесение нескольких видов питательных элементов;

3) выполнять экспресс-анализ обеспеченности почв питательными элементами и осуществлять внесение требуемых питательных элементов на заданные площади.

Общим случаем одновременного внесения нескольких видов питательных элементов является внесение механических смесей. Учитывая, что физико-механические свойства минеральных удобрений и туковые смеси обладают общими признаками, то при разработке технологических процессов и проектировании машин необходимо учитывать склонность смесей к расслоению.

На технологические и технические решения оказывает влияние форма и качество удобрений, содержание в них питательных элементов (III группа факторов).

Форма и качество минеральных удобрений (жидкие или твердые) (твердые кристаллические, пылевидные или гранулированные) оказывают определяющее влияние на технологическую и конструктивную схему машины, выбор типов рабочих органов и на ряд других параметров.

Содержание в минеральных удобрениях питательных элементов учитывается при разработке способов транспортирования, хранения и дозирования материала.

Влияние технических средств на функционирование агрохимической системы определяется качеством и надежностью выполнения технологического процесса, производительностью машин, степенью отрицательных воздействий на растение и почву и рядом других показателей.

1.4. Технологии внесения минеральных удобрений и технические средства для их реализации

Внесение питательных элементов в необходимых дозах и соотношениях осуществляется по нескольким технологическим схемам. На выбор технологической схемы внесения удобрений оказывает влияние материально-техническая база хозяйства, организационные и экономические факторы.

В наиболее общем случае технология использования минеральных удобрений заключается в выполнении следующих операций.

На заводе-поставщике удобрения загружаются в железнодорожные вагоны и транспортируются до прирельсовых складов. Здесь удобрения разгружаются и после непродолжительного хранения доставляются автотранспортом и складываются в глубинных хозяйственных или межхозяйственных складах. На глубинных складах, при наступлении агротехнических сроков, удобрения готовят к внесению. Подготовленные к внесению удобрения транспортируются к полю, а затем распределяются по его поверхности или заделываются в почву.

Известные технологические схемы применения минеральных удобрений и их смесей приведены на рис. 1.4.

*Технологические схемы применения
минеральных удобрений и их смесей*

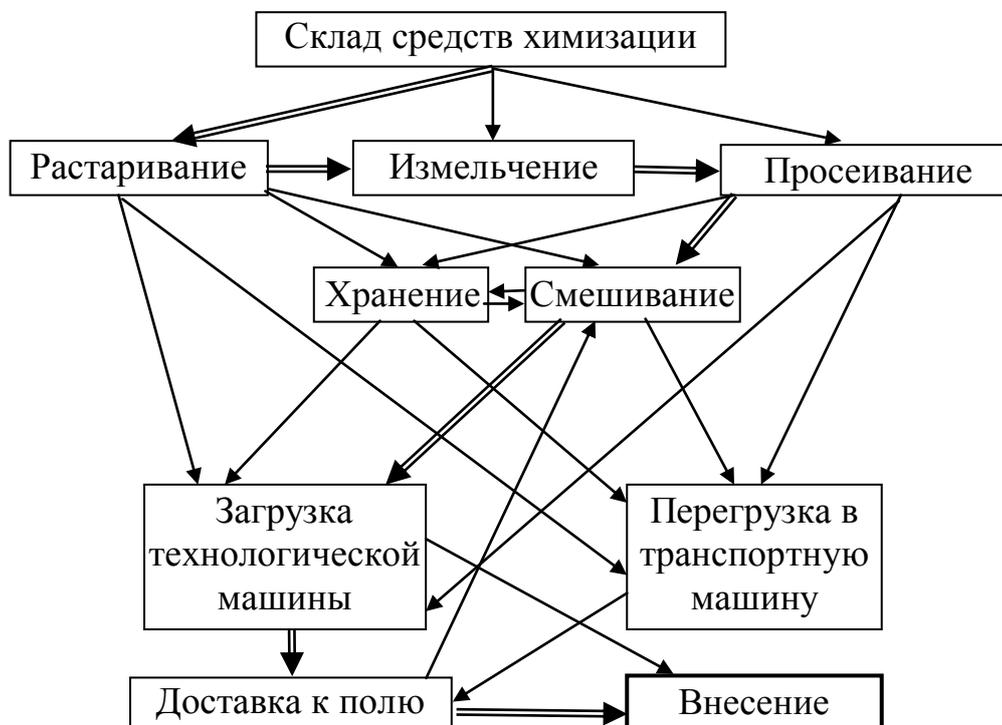


Рис. 1.4

Наиболее простой и чаще всего применяемой является прямоточная технологическая схема (на рис. 1.4 она изображена двойными линиями). До 80% минеральных удобрений и их смесей хозяйства вносят по этой технологической схеме, так как для её реализации требуется минимальное число технических средств. В зависимости от принятой технологической схемы внесение удобрений различают прямоточную и перевалочную технологии.

Перевалочная технология отличается от прямоточной тем, что доставка минеральных удобрений или туковой смеси от склада к месту внесения осуществляется автомобилями или тракторными прицепами, а затем удобрения перегружаются в емкости машин для их внесения.

При внесении простых или сложных удобрений из технологического процесса исключаются операция «смешивание».

Перед выполнением работ по внесению минеральных удобрений хозяйства накапливают необходимые виды удобрений на складах. В зависимости от того, какие питательные вещества и их дозы необходимы для данного поля, вычисляют требуемое соотношение компонентов туковой смеси. Необходимая доза внесения смеси

$$Q_{см} = Q_N + Q_P + Q_K \quad (1.1)$$

$$\text{где} \quad Q_N = \frac{q_N}{K_N} 100; \quad Q_P = \frac{q_P}{K_P} 100; \quad Q_K = \frac{q_K}{K_K} 100;$$

q_N, q_P, q_K – требуемые дозы внесения элементов питания;

K_N, K_P, K_K – концентрация питательных веществ в данном виде удобрения, индексы N, P, K – относятся к содержанию действующего вещества, соответственно азотного, фосфорного, калийного компонентов.

Для подготовки минеральных удобрений к внесению применяют следующие средства механизации.

Погрузка удобрений в растариватель-измельчитель осуществляется ленточными транспортерами (ЛТ-6, КЛП-500 и др.) или погрузчиками (ПФ-0,75; ПЭ-0,8Б; ПВА-1,0 и др.).

Для растаривания и измельчения минеральных удобрений используют растариватели – измельчители (АИР-20 и др.). Технологический процесс работы этих машин заключается в том, что затаренные минеральные удобрения подаются в измельчающее устройство, а после измельчения масса поступает на сепарирующее устройство, производящее выделение из удобрений измельченной мешкотары. Очищенные минеральные удобрения подаются отгрузочным транспортером в борт, транспортное средство или в смесительную установку.

Смешивание удобрений производится в местах его подготовки с помощью тукосмесительных установок (УТС-30 и др.) или при загрузке в кузов машины для внесения удобрений с помощью смесителя-загрузчика минеральных удобрений СЗУ-20.

Завершающей фазой технологического процесса внесения минеральных удобрений и их смесей является распределение частиц по полю.

Поверхностное внесение минеральных удобрений осуществляют навесными, полунавесными или прицепными машинами, распределительными рабочими органами которых являются метательные или штанговые рабочие органы.

Навесные машины чаще всего оборудуют бункером небольшой емкости. В качестве распределительных рабочих органов используются центробежные, маятниковые или ленточные метатели.

Прицепные машины выпускают бункерного или кузовного типов. Применение кузовов большой емкости позволяет снизить непроизводительные затраты времени связанные с переездами машины от места загрузки к полю. Распределение материала по полю осуществляют метательные или штанговые рабочие органы.

Принцип действия метательных рабочих органов основан на том, что частицам сообщаются начальные скорости метания, векторы которых направлены под разными углами, как к направлению движения машины, так и к горизонту. Центробежные аппараты, оборудованные ветрозащитными устройствами, имеют фиксированную ширину рассева, а аппараты без ветро-

защитных устройств распределяют частицы с переменной дозой по ширине посева. На краях засеваемой полосы дозы выпавших удобрений уменьшаются. Для обеспечения требуемых агротехникой показателей качества распределения, машины должны работать с перекрытием смежных проходов.

Как отмечалось выше, при внесении туковых смесей центробежными рабочими органами наблюдается расслоение смесей, приводящее к нарушению равномерности распределения компонентов. Выбор перекрытия и точность вождения агрегата оказывают заметное влияние на качество выполнения технологического процесса.

Ящичные сеялки состоят из рамы, тукового ящика, туковысевающих аппаратов и механизма привода. Эти сеялки имеют высевающие аппараты тарельчатого, цепного, катушечного и других типов. Равномерность распределения частиц, по общей ширине посева, у них выше, чем у машин с металлическими аппаратами. Но они обладают значительными недостатками. У них узкий туковый ящик, длина которого равна ширине захвата машины, они обладают большой удельной материалоемкостью, непригодны для внесения удобрений по прямой технологии, громоздки при транспортировке, а для перевода их в транспортное положение требуются большие затраты ручного труда.

Ящичные сеялки используются для поверхностного внесения удобрений, как правило, с дозами до 300 кг/га как самостоятельные машины или в составе комбинированных агрегатов.

Рассмотренные технологии и технические средства предназначены для внесения минеральных удобрений и их смесей по усредненным показателям, определенным агротехникой для всего поля. Эти технологии широко применялись во второй половине 20 века при больших объемах внесения средств химизации. Недостатком таких технологий является низкая агрономическая и экономическая эффективность использования минеральных удобрений, экологическая опасность, связанная с избытком доз питательных элементов, приводящая к накоплению нитратов в почве, водоемах и растениях, недобор урожая, вызванный пестротой почвенного плодородия.

Повышение эффективности применения минеральных и обеспечение экологической безопасности решается в технологиях адаптированного внесения питательных элементов с учетом биологических особенностей возделываемых культур, неоднородности почвенного плодородия, периода вегетации.

Реализация адаптивных технологий в производство сдерживается отсутствием серийного выпуска машин, обеспечивающих точное дозирование и равномерное распределение многокомпонентных смесей.

Общими вопросами адаптации технологических процессов и рабочих органов сельскохозяйственных машин к зональным и конкретным агроландшафтным условиям занимались научные коллективы под руководством академиков В.И. Аниськина, А.А. Жученко, Э.И. Липковича, и ряд других ученых.

Применительно к механизированным технологиям посева и внесения минеральных удобрений основные положения адаптации технических средств к условиям функционирования сформулированы в работах академиков В.И. Аниськина, Н.В. Краснощекова, Л.П. Кормановского, Э.И. Липковича, докторов технических наук профессоров Н.М. Беспямятновой и В.А. Черноволова, доктора сельскохозяйственных наук Р.А. Афанасьева, докторов технических наук Н.М. Марченко, Г.И. Личмана и других.

Вопросам адаптации машин для внесения минеральных удобрений к видам минерального питания растений и рельефу поля посвящены работы А.М. Бондаренко, Н.М. Марченко, Г.И. Личмана, В.А. Черноволова, В.А. Шмониной, Ю.И. Якимова, В.А. Адамчука, В.И. Вялкова, Е.А. Губарева и других.

Распределение минеральных удобрений и их смесей по поверхности поля является сложным процессом, зависящим от ряда факторов. К ним относятся: способ внесения; способ приготовления туковой смеси; конструкция машины; тип распределительного рабочего органа; способ транспортирования материала от рабочего органа до поверхности поля; внешние воздействия окружающей среды; рельеф местности, фон поля и ряд других.

Агрохимические свойства минеральных удобрений оцениваются содержанием питательных элементов (N, P, K), их соотношением, размерами частиц и рядом других показателей. Агрономическая ценность минеральных удобрений зависит не только от размеров частиц, но и от способности данного вида удобрений сохранять исходное содержание питательных элементов. Так, аммиачная селитра при увлажнении обладает повышенной склонностью к потере азота. Кроме того, при приготовлении туковых смесей наблюдается химическое взаимодействие компонентов, приводящее не только к потере питательных элементов, но и к ухудшению физико-механических свойств смеси. Следовательно, технологическая схема, предусматривающая приготовление туковой смеси на складе, является менее предпочтительной. Эти смеси расслаиваются при хранении на складе, при перегрузках в транспортное средство и в бункер или кузов машины, при транспортировке её к полю.

Расслоение является одной из основных причин снижения эффективности применения туковых смесей. Вследствие расслоения смесей происходит неравномерное распределение частиц компонентов не только по ширине полосы посева, но и по длине прохода. Интенсивность расслоения смесей в значительной степени зависит от принятой технологической схемы применения смесей, степени воздействия рабочих органов машин на всех этапах технологического процесса, технологической схемы машины, типов рабочих органов и режимов их работы и ряда других факторов.

Снижение влияния расслоения смесей на качество их распределения может быть достигнуто при использовании других технологических схем. Основными из них являются схемы, предусматривающие приготовление ту-

ковых смесей при загрузке машины для внесения удобрений или схемы, в которых каждый из компонентов загружается в отдельные емкости машины.

При приготовлении смеси в процессе загрузки машины сокращается время химического взаимодействия, исключается расслоение при хранении, при перегрузках и при транспортировке их к полю. Однако такие технологические схемы мало приспособлены к решению задач адаптивного дифференцированного внесения минеральных удобрений. По данным ВНИПТИМЭСХ содержание в почве питательных элементов даже в пределах одного поля изменяется в 3-5 раз.

В наибольшей степени требованиям адаптивного внесения удовлетворяют технологические схемы, предусматривающие загрузку каждого из компонентов в отдельные емкости. В этом случае возможны следующие технологические схемы машин, предусматривающие:

- 1) приготовление туковой смеси перед подачей её на распределительный рабочий орган;
- 2) смешивание компонентов распределительным рабочим органом;
- 3) распределение каждого из компонентов отдельным рабочим органом.

При использовании первой технологической схемы машины на качество распределения компонентов по полю оказывают влияние расслоение подающими и распределительными устройствами.

У метательных рабочих органов необходимо учитывать расслоение смеси при движении её по рабочим поверхностям и при полете в воздушной среде. Причем на качество распределения компонентов значительное влияние оказывает выбор и соблюдение расстояния между смежными проходами агрегата.

Штанговые рабочие органы имеют фиксированную ширину распределения и на расслоение смесей воздушной средой можно пренебречь. Качество распределения компонентов определяется точностью их дозирования по ширине захвата машины и вдоль направления движения.

Технологическая схема машины, предусматривающая смешивание компонентов распределительным рабочим органом реализована нами для двух видов удобрений. В данной схеме подача каждого из компонентов осуществляется в заданные зоны распределительного рабочего органа. Преимуществом её перед ранее рассмотренными схемами является отсутствие смесительного рабочего органа.

Распределение каждого из компонентов отдельным рабочим органом аналогично установке на одной машине нескольких (3-4) агрегатов, каждый из которых функционирует независимо. В этом случае возникает возможность осуществлять внесение необходимого числа компонентов на заданной ширине посева. У метательных рабочих органов достижение требуемых качественных и количественных показателей распределения каждого из компонентов можно достигнуть за счет установки дозаторов на требуемую подачу, выбора необходимой скорости метания и положения сектора посева.

Такая технологическая схема машины в наибольшей степени удовлетворяет требованиям, но для её реализации необходимо управлять рядом параметров. Отсутствие средств и систем объективного и систематического контроля и управления технологическими процессами машин для внесения минеральных удобрений является сдерживающим фактором. Это обусловлено тем, что визуальная настройка рабочих органов машин носят индивидуальный характер, зависящий от квалификации механизатора и ряда других факторов, и не может претендовать на достаточную точность.

Следовательно, для реализации задач адаптивного внесения минеральных удобрений процессы дозирования, подачи и распределения должны быть автоматизированы.

1.5. Показатели, характеризующие эффективность процесса внесения минеральных удобрений и их смесей

Потери урожая от неравномерного внесения минеральных удобрений

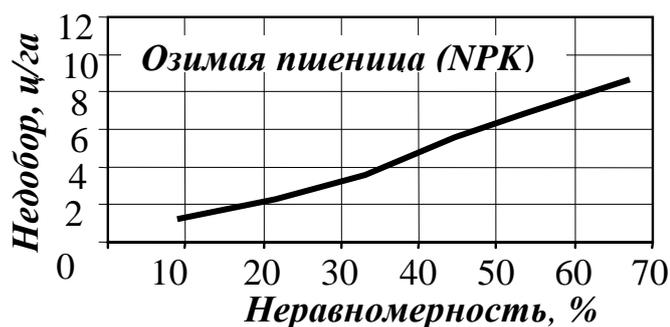


Рис. 1.5

Одной из главных агротехнических показателей работы машин для внесения минеральных удобрений является равномерность распределения материала по поверхности поля. На рис. 1.5 приведена зависимость потерь урожая от неравномерного внесения смесей минеральных удобрений. Зависимости получены путем обработки данных агрохимических исследований по различным природно-климатическим зонам России и республик бывшего СССР.

Зависимость (рис. 1.5), описывающая потери урожая от неравномерного внесения удобрений аналогичны для разных культур и видов удобрений.

Многочисленными исследованиями доказано, что на агротехнические показатели применения минеральных удобрений оказывают влияние тип распределительного рабочего, равномерность распределения минеральных удобрений и компонентов туковой смеси по обрабатываемой поверхности, способ внесения удобрений.

У машин, оборудованных распределительными рабочими органами броскового типа, на распределение частиц по поверхности поля влияет ряд факторов, анализ которых будет сделан ниже.

Так как у бросковых аппаратов распределение минеральные удобрения и компонентов туковой смеси по ширине рассева неравномерно, особенно по краям полосы рассева, то для обеспечения агротехнических требований равномерности, машины работают с перекрытием смежных проходов. При этом рабочая ширина рассева оказывается меньше общей ширины. Влияние величины перекрытия при смежных проходах на равномерность распределения минеральных удобрений изучали многие авторы. Наиболее удачно данная зависимость может быть представлена в виде графика (рис. 1.6), предложенного В.А. Черноволовым. Данный график показывает взаимосвязь равномерности распределения с шириной рассева, то есть с производительностью агрегата.

Ширина рассева B_s соответствует наибольшей рабочей ширине B_p , обеспечивающей максимальную производительность машины. Эту ширину называют эффективной. При оптимальной ширине рассева B_o достигается минимальная неравномерность распределения удобрений по рабочей ширине. Как видно из графика (рис. 1.6) допустимая неравномерность $[H]$ достигается при двух значениях рабочей ширины рассева. Разность $\Delta B = B_s - B_1$ - допуск на точность вождения агрегата.

Влияние ширины захвата машины на неравномерность распределения центробежно-дисковым аппаратом

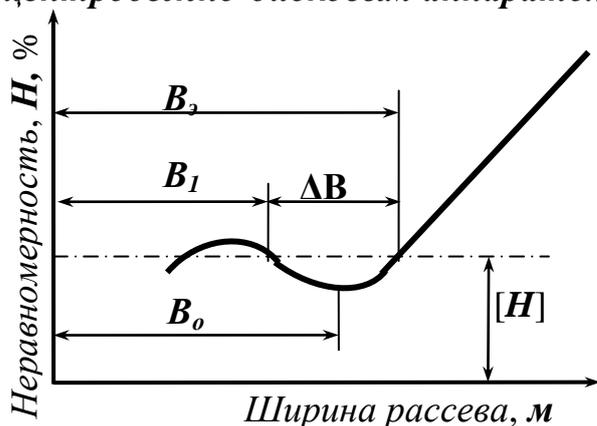


Рис. 1.6

Качество внесения минеральных удобрений в значительной степени зависит от выбора ширины рассева и точности вождения агрегата. Вопросы выбора, а главное обеспечения требуемой рабочей ширины рассева в процессе движения машины по полю являются сложной научной и технической задачей. Это вызвано тем, что машины, оборудованные метательными рабочими органами, имеют рабочую ширину рассева больше чем конструктивная ширина. Для обеспечения требуемой ширины рассева приходится выполнять разметку поля или оборудовать машины следоуказателями. На практике чаще всего выбор перекрытия производят визуально. Результаты производственной проверки показали, что без разметки поля ошибки механизатора в вождении агрегата могут быть значительными. Так при заданной ширине рассева 10 м действительная ширина рассева колебалась от 6,6 до 16,3 м.

Количественная оценка качества распределения удобрений по поверхности поля выполняется по коэффициенту вариации V_s

$$V_s = 100 \frac{\sigma_F}{\bar{q}_F}, \quad (1.2)$$

где σ_F – среднее квадратическое отклонение доз, равное

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{\sum (q_i - \bar{q}_F)^2}{n - 1}}, \quad (1.3)$$

\bar{q}_F – среднее значение доз удобрений, попавших в улавливатель;

q_i – текущее значение доз;

n – число оцениваемых доз (проб).

Относительно мало работ посвящено изучению закономерностей распределения компонентов туковых смесей по поверхности поля центробежными рабочими органами.

При рассеве туковых смесей из-за расслоения материала при движении по поверхностям рабочих органов и при полете в воздушной среде, эффективная ширина рассева компонентов будет разной. С.И. Назаров и И.В. Румянцев, рассматривая различие компонентов по аэродинамическим характеристикам, пришли к выводу, что выбор рабочей ширины рассева необходимо выполнять по компоненту, имеющему наименьшую дальность полета. Однако нашими исследованиями доказано, что на эффективную ширину рассева значительное влияние оказывает расслоение смеси при движении по лопаткам распределительных рабочих органов. Расслоение смесей на диске приводит к смещению секторов рассева компонентов.

Дозы и качество распределения компонентов по полю и, особенно, туковых смесей зависит от правильности настройки машины. Авторы работ рекомендуют настройку рабочих органов выполнять визуально. Но такие регулировки носят индивидуальный характер, зависящий от квалификации механизатора и ряда других факторов, и не могут претендовать на достаточную точность. Исследованиями /278/ показано, что такая настройка даёт большие погрешности (в определении ширины рассева – 20%, неравномерности – 41%, нормы высева – 49%).

Настройку центробежных рабочих органов на симметричность рассева при эксплуатации машин необходимо выполнять периодически, а контроль точности настройки – систематически. Это обусловлено тем, что при работе машины в течение смены физико-механические свойства удобрений изменяются (например, вследствие изменения влажности воздуха, воздействия осадков и т.п.). Кроме того, контроль точности настройки необходимо выполнять при изменении вида вносимых удобрений или состава туковой смеси.

Из изложенного следует, что на качественные и количественные показатели процесса распределения минеральных удобрений и их смесей влияет расслоение смесей и точность настройки распределительных рабочих органов. Это свидетельствует о том, что совершенствование технологического процесса должно вестись в направлениях создания новых распределительных

рабочих органов, снижающих влияние расслоения и разработки методов контроля и управления процессами распределения туковых смесей.

1.6. Анализ технических средств и методов совершенствования процесса распределения минеральных удобрений

В качестве рабочих органов аппаратов броскового типа используют центробежные диски с вертикальной и горизонтальной осями вращения, маятниковые, пневматические и центробежно-пневматические аппараты, ленточные метатели и другие.

Аппараты броскового типа сообщают частицам кинетическую энергию, разгоняя их, а затем выбрасывают в виде веера или струи. Частицы приобретают начальную скорость, вектор которой в общем случае направлен под углом к горизонту. После выхода из аппарата частицы совершают полет в воздушной среде, а затем распределяются по поверхности поля. Вследствие этого ширина рассева минеральных удобрений будет значительно больше конструктивной ширины машины.

Наибольшее распространение получили маятниковые и центробежные дисковые бросковые аппараты. Маятниковые аппараты обеспечивают близкие к центробежно-дисковым аппаратам показатели равномерности распределения, но из-за плохой приспособленности к рассеву удобрений повышенной влажности и туковых смесей применяются реже.

Технологический процесс центробежных аппаратов с вертикальной и горизонтальной осями вращения протекает аналогично, и, применяя методы анализа систем, выделяют три последовательно происходящие фазы:

- движение частиц по поверхности рабочего органа;
- полет частиц в сопротивляющейся воздушной среде;
- распределение частиц по поверхности поля.

Так как первые две фазы технологического процесса оказывают определяющее влияние на качество распределения питательных веществ по поверхности поля, то их анализу посвящено большое число работ.

Изучением процесса движения частиц по лопаткам центробежного диска занимались: П.М. Василенко, А.А. Кукибный, М.Г. Догановский, Е.В. Козловский, С.И. Назаров, Б.Г. Турбин, В.В. Рядных, В.А. Скользаев, В.А. Черноволов, Б.А. Кушилкин, А.А. Смолев, Ю.И. Якимов, И.В. Румянцев, В.И. Александров, В.И. Якубаускас, В.Н. Четверня, Е.С. Кегелес, D.E. Paterson, A.R. Reese, F.M. Inns, W. Hollman, A. Mathes и другие.

Решение задачи динамики движения материальной точки по лопаткам центробежного диска в общем виде выполнил академик П.М. Василенко.

Из анализа сил, действующих на частицу (рис. 1.7), получено дифференциальное уравнение движения:

$$\xi'' = \omega^2 r \cdot \cos \psi - fg \pm f\omega^2 r \sin \psi - 2f\omega\xi', \quad (1.4)$$

общее решение которого имеет вид

$$\xi = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + r_0 \frac{\cos(\varphi \pm \psi_0)}{\cos \varphi} - \frac{fg}{\omega^2}, \quad (1.5)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования;

λ_1 и λ_2 – корни характеристического уравнения, равные

$$\lambda_1 = \omega(\sqrt{1+f^2} - f), \quad \lambda_2 = -\omega(\sqrt{1+f^2} + f).$$

Значения постоянных интегрирования C_1 и C_2 определяются из начальных условий. При поступлении частицы на лопатку со скоростью $\xi' = 0$, получено выражение для определения перемещения

**К анализу движения частицы
по лопаткам центробежного аппарата**

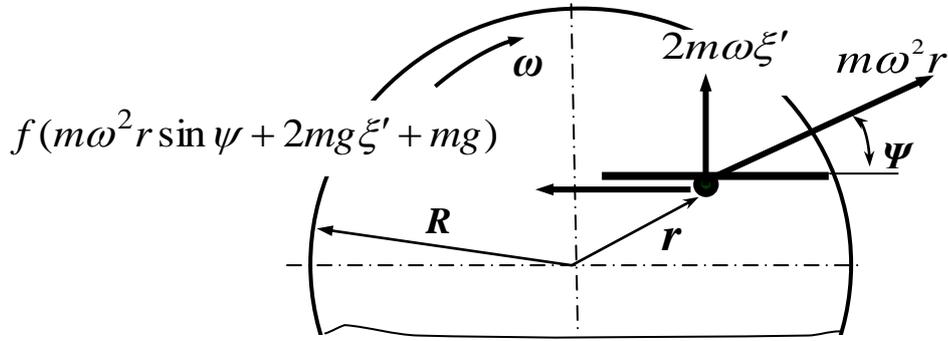


Рис.1.7

$$\xi = \left[\frac{fg}{\omega^2} - r_0 \frac{\cos(\varphi \pm \psi_0)}{\cos \varphi} \right] \left(\frac{\lambda_2 e^{\lambda_1 t} - \lambda_1 e^{\lambda_2 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) \quad (1.6)$$

и скорости относительного движения частицы вдоль лопатки

$$\xi' = V_r = \left[\frac{fg}{\omega^2} - r_0 \frac{\cos(\varphi \pm \psi_0)}{\cos \varphi} \right] \left(\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) \right). \quad (1.7)$$

Наиболее удачное упрощенное решение уравнений (1.5) ... (1.7) нашли М.Г. Догановский, Е.В. Козловский и В.В. Рядных. Для лопаток, установленных радиально относительная скорость схода частицы и угол поворота диска за время относительного движения, равны:

$$V_r = \frac{\omega^2 R \cos \varphi - g \sin \varphi}{\omega(1 - \sin \varphi)}, \quad (1.8)$$

$$\omega t_\ell = \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \ln \frac{2(\omega^2 R \cos \varphi - g \sin \varphi)}{(1 + \sin \varphi)(\omega^2 r_0 \cos \varphi - g \sin \varphi)}. \quad (1.9)$$

Patterson D.E., Reese A.R. значительно упростили зависимости для определения угла схода и скорости метания. Расчеты, выполненные по ним, дают завышенные результаты, что снижает их практическую ценность.

Погрешности формул (1.8) и (1.9) не превышают 5-7% при рассеве частиц однородного состава.

Рассматривая процесс взаимодействия частиц с лопаткой диска, в ряде работ отмечается, что при значительном удалении места подачи от центра диска происходит частично упругий удар. Частица отразится от поверхности лопатки со скоростью $V_a = \omega r_0 (1 + k)$, где k коэффициент восстановления.

Приведенные выше результаты исследований процесса движения материальной точки по лопаткам центробежного диска не позволяют определить угол поворота диска и относительную скорость схода частиц компонентов туковой смеси, так как они не учитывают влияния взаимодействия частиц друг на друга в процессе движения.

Из выражений (1.6...1.7) следует, что угол поворота диска и скорость относительного движения зависят от фрикционных характеристик компонентов смеси. Таким образом, при рассеве туковой смеси следует ожидать, что (из-за различия коэффициентов трения частиц компонентов) углы и относительные скорости схода частиц разных компонентов будут отличаться.

Так как на центробежный диск поступает поток частиц, то по лопатке будет двигаться “сыпучее тело”. Сход частиц с диска будет происходить на некоторой дуге. Центральный угол, в пределах которого сходят с диска “крайние” частицы сыпучего тела называют углом сектора метания. Угол сектора метания определяется выражением:

$$2\alpha_m = \omega t_{\max} - \omega t_{\min}. \quad (1.10)$$

Центральный угол, в пределах которого происходит рассев частиц, называют углом сектора рассева. Если направляющие устройства отсутствуют, то углы секторов метания и рассева совпадают.

Подставив в уравнения (1.8) или (1.9) вместо r_0 радиусы r_1 начала и r_2 - конца “сыпучего тела” определится угол сектора метания. Для диска с радиальными лопатками угол $2\alpha_m$ сектора метания равен

$$2\alpha_m = \frac{\cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (1.11)$$

Распределение частиц по углу сектора метания и его величина оказывают значительное влияние на качество внесения удобрений. Поэтому большое число работ направлено на изучение и описание этих закономерностей.

Рядом исследований доказано, что более качественное распределение удобрений по поверхности поля может быть получено при нецентральной загрузке (переменная плотность распределения частиц в секторе метания) и величине сектора рассева (180...225)°. Изменением места подачи удобрений на диск можно управлять распределением частиц по полю.

Ю.И. Якимов для обеспечения качественного распределения частиц по поверхности поля рекомендует создавать заданное распределение частиц в секторе метания, которое не соответствует закону равномерной плотности.

Отсутствие единого мнения по выбору угла сектора метания объясняется многообразием факторов, влияющих на качество распределения частиц по поверхности поля или неполным их учетом.

На закономерности распределения частиц в секторе метания оказывают влияние:

- радиус подачи материала на диск;
- подача материала;
- конструктивные параметры диска (положение и форма лопаток; углы конусности диска; радиус диска; форма лопаток и др.);
- кинематические параметры диска (угловая скорость).

По данным И.В. Сысоева и В.А. Черноволова увеличение частоты вращения диска с 40 до 80 с⁻¹ вызывает уменьшение сектора рассева на 15%, а изменение подачи с 0,05 до 1,6 кг/с – рост его на 45%.

Исследования Ю.И.Якимова и С.И. Волосникова показывают, что качество распределения частиц повышается при установке лопаток с заостренными верхними кромками радиально или наружный обрез отклонять против вращения на небольшой угол.

Для увеличения ширины рассева и повышения качества распределения частиц удобрений по поверхности поля в мировой практике находят применение конусные диски. Такие рабочие органы применяются как на отечественных (РСМ-6, КСА-3, РУМ-8, РУМ-5 и др.), так на зарубежных Хок-Билт 235 (США) машинах. Они показали хорошие результаты на рассеве минеральных удобрений, но требуют проверки эффективности при внесении туковых смесей.

Выбор угловой скорости диска связан с достижением необходимой скорости метания частиц. В работах рекомендуется скорость метания выбирать в пределах 8...30 м/с, а И.И. Пиуновский замечает, что максимальная дальность полета частиц ограничена коэффициентом парусности.

На закономерности распределения частиц минеральных удобрений и их смесей оказывают влияние конструктивные и кинематические параметры диска, подача материала и способ её организации.

При центральной загрузке аппарата распределение частиц в секторе метания близко к равномерному, а в аппаратах с нецентральной загрузкой близко к нормальному распределению вероятностей, но полностью с ним не совпадает.

Исследования закономерностей распределения частиц туковых смесей в секторе метания показывают, что в процессе движения смесей по лопаткам центробежных дисков происходит расслоение (сепарация) смесей. Она проявляется в том, что в начале сектора преобладают крупные, а в конце - мелкие частицы.

При нецентральной загрузке аппарата кривые распределения фракций (размерных групп) в секторе метания имеют вид выпуклых кривых, близких к кривым нормального распределения вероятностей. Кривые распределения фракций смеси смещены друг относительно друга, что оказывает отрицательное влияние на равномерность распределения частиц по поверхности поля.

Ю.И. Якимов и С.И. Волосников, для повышения равномерности распределения тукосмесей, рекомендуют подачу осуществлять вблизи периферии диска, а у других авторов радиус подачи рекомендуется принимать 0,075...0,100 м.

В.А. Черноволов и Т.М. Ляшенко, изучая чувствительность центробежного аппарата к изменению фрикционных характеристик минеральных удобрений, пришли к выводу, что оптимальные значения радиуса подачи 0,17...0,19 м, а лопасти необходимо отклонять против направления вращения диска на угол 0,53...0,61 рад.

Выявление закономерностей распределения частиц в секторе метания и получение математических зависимостей, описывающих их, является необходимым условием прогнозирования закономерностей распределения смеси и её компонентов по поверхности поля.

В.А. Скользаев и В.А. Черноволов впервые предложили распределение частиц в секторе метания описывать функцией распределенной производительности:

$$q_{\alpha} = Q_{\alpha} \cdot p(\alpha), \quad (1.12)$$

где Q_{α} – подача материала на бросковый аппарат;

$p(\alpha)$ – плотность распределения частиц по углу сектора метания.

При центральной загрузке аппарата функция $p(\alpha)$ плотности имеет вид:

$$p(\alpha) = \frac{1}{2\alpha_m} = const.$$

При нецентральной загрузке аппарата принимается, что распределение частиц в секторе метания может быть описано с помощью закона нормального распределения:

$$q_{\alpha} = \frac{Q_{\alpha}}{\sigma_{\alpha} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\alpha - \alpha_{cp})^2}{2\sigma_{\alpha}^2}}, \quad (1.13)$$

где α_{cp} – среднее значение угла схода частиц;

σ_{α} – среднее квадратическое отклонение углов α схода частиц.

Из (1.13) следует, что для описания закономерностей распределения частиц в секторе метания при нецентральной загрузке аппарата необходимо определить α_{cp} и σ_{α} .

На форму зоны рассева и её размеры помимо закономерностей распределения частиц в секторе метания оказывает значительное влияние дальность полета частиц. С ростом дальности полета частиц увеличивается ширина полосы рассева, а, следовательно, и производительность машины.

Изучением закономерностей движения тел в сопротивляющейся воздушной среде занимались Л. Эйлер, Н.Е. Жуковский, А.И. Лурье и другие. Применительно к движению в воздушной среде сельскохозяйственных материалов задачу баллистики решали Г.Д. Терсков, И.Ф. Пикуза, С.И. Назаров, В.А. Волков, И.А. Истрафилов, А.А. Кукибный, Е.В. Козловский и другие.

Изучением распределения частиц минеральных удобрений центробежными аппаратами с вертикальной и горизонтальной осями вращения занимались С.И. Назаров, В.А. Черноволов, Ю.И. Якимов, С.И. Волосников, В.А. Скользаев, В.А. Волков, И.В. Румянцев, И.В. Морин, С.А. Тыльный, Е.Н. Четверня, В.Я. Изотов и другие.

Основываясь на работах Н.Е. Жуковского, получены дифференциальные уравнения движения частицы в воздушной среде. При сопротивлении среды, пропорциональной квадрату относительной скорости и без учета влияния боковых сил

$$\begin{aligned} mx'' &= -mk_n V^2 \cos \alpha \\ my'' &= -mg \pm k_n V^2 \sin \alpha, \end{aligned} \quad (1.14)$$

где α – угол между касательной к траектории движения и горизонтальной осью $-x$;

V – скорость полета частиц;

k_n – коэффициент парусности.

Так как дифференциальные уравнения (1.14) точно не интегрируются, то в ряде работ предложены приближенные методы решения.

Для центробежного диска с вертикальной осью вращения, установленного на высоте H_0 и начальном угле метания α_0 скорость метания, необходимая для достижения дальности x_{\max} , будет равна:

$$V_0 = \sqrt{\frac{2g \cdot k_n x_{\max}^3 + 3x_{\max}^2}{6H_0}}. \quad (1.15)$$

В.А. Волков, заменяя в (1.18) $\cos \alpha$ на $k_x \cos^2 \alpha$ и $\sin \alpha$ на $k_y \sin^2 \alpha$, получил зависимости дальности полета частиц с учетом углов метания. Дальнейшее развитие работы В.А. Волкова выполнено С.И. Назаровым и И.В. Румянцевым.

А.А. Кукибный, рассматривая ряд (1.14), получил зависимость для определения дальности полета частицы:

$$x_{\max} = \frac{0,75}{k_n} \left(\sqrt{0,272 k_n v_0^2 \sin 2\alpha_0 + 1} - 1 \right).$$

Анализируя, данную зависимость он установил, что при условии $v_0^2 \sin 2\alpha_0 \geq 200$ сепарация смеси аэродинамическими силами становится эффективной, но если коэффициенты парусности компонентов близки, разделить их аэродинамическими силами невозможно.

Изучая причины низкого качества распределения по поверхности поля минеральных удобрений и, особенно, их смесей в ряде работ отмечается, что основной причиной сепарации смесей при полете в воздушной среде является различие компонентов по коэффициентам парусности.

Многие исследователи, при описании закономерностей распределения частиц по ширине полосы рассева центробежно-дискового аппарата, полагают, что зона распределения имеет форму части кольца, перемещающуюся со скоростью V_m (рис.1.8).

W. Hollman и A. Mathes считают, что распределение частиц по площади кольца равномерное, а В.А. Черноволов, Ю.И. Якимов, С.И. Волосников и другие отмечают, что при метании частиц с близкими скоростями, распределение их вдоль линия метания близко к нормальному распределению вероятностей.

И.В. Морин, предположив, что распределение частиц на любом удалении от оси движения машины пропорционально длине h_o (рис.1.8) полоски, пришел к выводу, что центробежно-дисковому аппарату присуще свойство естественной неравномерности.

Так как неравномерность распределения частиц по ширине полосы рассева оказывается значительно больше допускаемой агротехнической нормой, то предпринимаются попытки найти простые зависимости для нахождения перекрытия при смежных проходах машины. Основываясь на принятых И.В. Мориным допущениях, С.В. Тильный получил зависимости для определения величины перекрытия при смежных проходах.

В.Н. Четверня для определения рабочей ширины рассева рекомендует /261/ величину перекрытия принимать, равной $\Delta B = 1,6\sigma_\rho$, где σ_ρ - среднее квадратическое отклонение дальностей полета частиц.

Для определения дозы выпавших удобрений на любом удалении от оси прохода разбрасывателя и выбора перекрытия ΔB при смежных проходах В.А. Черноволов рекомендует пользоваться зависимостью

$$q_F = \int_0^{t_1} \frac{Q_\alpha}{\rho} p(\alpha)p(\rho)dt, \quad (1.16)$$

где t_1 – время выпадания, определяемое из выражений:

$$\begin{aligned} \text{при } 0 < |x| < \rho_2 \sin \alpha_m & \quad t_1 = \frac{\rho_1 \cos \alpha_1 - \rho_2 \cos \alpha_2}{V_m}; \\ \text{при } \rho_2 \sin \alpha_m < |x| < \rho_1 \sin \alpha_m & \quad t_1 = \frac{\rho_1 \cos \alpha_1 - \rho_2 \operatorname{ctg} \alpha_m}{V_m}; \\ \text{при } \rho_1 \sin \alpha_m < |x| < \rho_2 & \quad t_1 = \frac{2\rho_1 \cos \alpha_1}{V_m}. \end{aligned}$$

**К описанию закономерностей распределения удобрений
центробежно-дисковым аппаратом по ширине рассева**

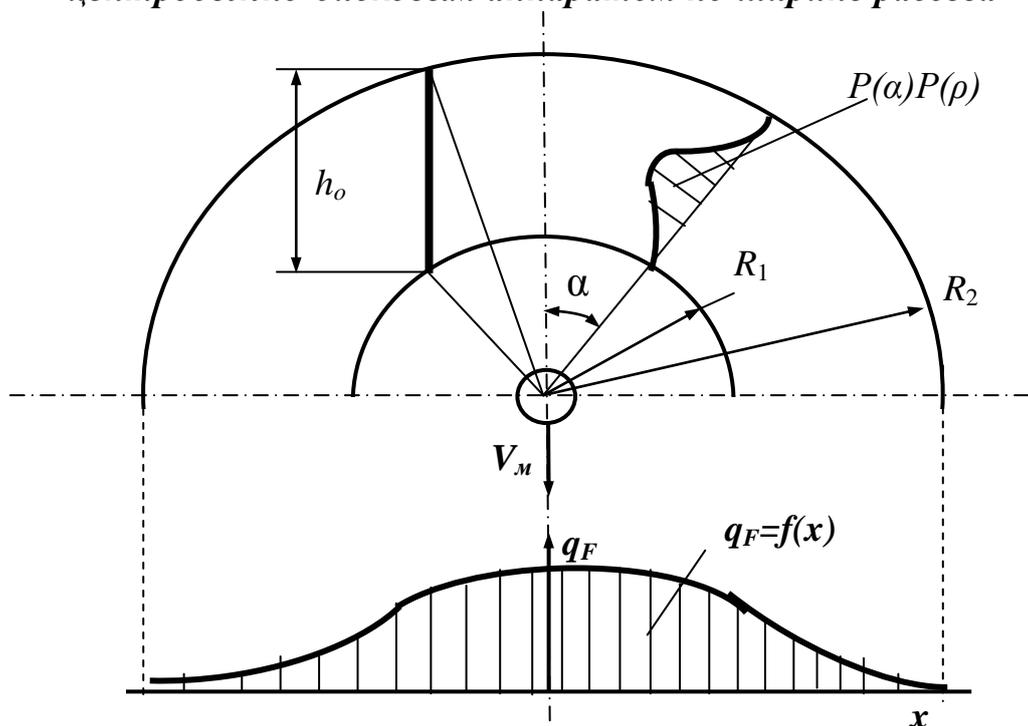


Рис. 1.8

Зависимость (1.16) может рассматриваться как общая. Для определения дозы выпавших удобрений на любом удалении от оси движения машины достаточно иметь закономерности распределения частиц по углу сектора рассева и вдоль линии метания.

Изучение закономерностей распределения смесей минеральных удобрений и её компонентов в основном выполнялось экспериментально. В ряде работ отмечается, что на ширину захвата машины оказывает влияние способ движения агрегата. Данный вывод основывается на анализе кривых распределения простых видов удобрений и требует проверки и дальнейшего обоснования.

Д.Г. Грачев и Н.В. Бабенко при анализе распределения тукосмеси по ширине полосы рассева установили, что при распределении смеси с неравномерностью 25% сегрегация (расслоение) компонентов достигает 30%. По мнению этих авторов, сегрегация не должна превышать 20%.

В.Я. Изотов, изучая распределение смеси и её компонентов по поверхности поля, утверждает, что распределение компонентов смеси совпадает с распределением каждого из них при отдельном рассеве. Но нашими работами и исследованиями Ю.И. Якимова и С.И. Волосникова доказано, что уже на выходе из аппарата сектора рассева компоненты смеси смещаются друг от-

носителем друга. Это свидетельствует о том, что при движении частиц смеси по лопаткам рабочих органов наблюдается расслоение (сегрегация).

Анализ процесса распределения минеральных удобрений и их смесей центробежными рабочими органами показывает, что он глубоко изучен с точки зрения внесения односторонних удобрений. Однако эти рабочие органы неудовлетворительно функционируют в технологических процессах внесения туковых смесей и требуют дальнейшего совершенствования. Распределением частиц по поверхности поля можно управлять за счет изменения координат места подачи материала, кинематических (угловой скорости диска) и конструктивных (постановкой лопаток к радиусу диска, наклоном лопаток к горизонту, радиусом диска) параметров рабочего органа.

Во второй половине 20 века в мировой практике получили широкое распространение штанговые распределительные системы /9, 16, 40, 54, 246/. Эти системы представляют собой дополнительное оборудование, устанавливаемое на машины для основного внесения минеральных удобрений и их смесей взамен центробежным рабочим органам. Они совмещают в себе преимущества кузовных машин (малую удельную материалоемкость, высокую производительность) и туковых сеялок (лучшую, чем центробежные рабочие органы, равномерность).

Основным элементом штанговой сеялки является распределительное устройство, выполненное в виде поперечно расположенной штанги с каналом круглого или прямоугольного сечения. Внутри канала находится транспортирующий механизм.

По способу движения материала транспортирующим устройством, штанговые сеялки делятся на тупиковые (закрытые), замкнутые (кольцевые) и открытые.

В зависимости от типа транспортирующего механизма штанговые сеялки подразделяются на пневматические, ленточные, шнековые, спирально-шнековые, вибрационные, метательные и гравитационные.

В пневматических сеялках для надежного транспортирования гранулированных удобрений, скорость воздушного потока должна быть более 22 м/с. Гранулы, перемещаясь с такой скоростью, интенсивно разрушаются, что отрицательно влияет не только на эффективность применения удобрений, но и на экологию. Образовавшаяся при истирании пыль, вместе с отходящим воздухом, поднимается в атмосферу.

Это сдерживает применение открытых распределительных устройств в машинах для внутрпочвенного внесения удобрений. Кроме того, при высеве удобрений повышенной влажности происходит залипание тукопроводов и, как следствие, их забивание. Ширина захвата пневматических сеялок непостоянна, а неравномерность распределения по полю достигает 20-30 %.

У пневмоцентробежных сеялок подача удобрений осуществляется в вентилятор, что дает возможность использовать вентиляторы с более низким напором, чем у пневматических сеялок.

Подача удобрений в вентилятор вызывает разрушение гранул лопастями вентилятора, а из-за коррозии сокращается срок службы вентилятора.

Ленточные штанговые сеялки распределяют удобрения по ширине гладкой гибкой лентой, установленной на ведущем и ведомом барабанах.

Обладая высокой антикоррозионной стойкостью, прорезиненная лента, имеет сложную конструкцию, плохо герметизируется, а из-за неизбежного скольжения и налипания удобрений на барабан снижается равномерность высева.

Скребокковые штанговые сеялки в качестве тягового органа имеют ленту или цепь, к которой прикреплены скребки. Принцип работы основан на том, что удобрения, поступающие из бункера в кожух, захватываются скребками и перемещаются по днищу кожуха. Ширина днища постепенно уменьшается, поэтому удобрения скребками сбрасываются на поверхность поля по всей ширине захвата.

Из-за высокой неравномерности распределения удобрений, обусловленной пульсирующим перемещением материала, скребковые штанговые сеялки не нашли широкого применения.

Шнековые штанговые сеялки представляют собой кожух, в котором размещен один шнек или система шнеков, распределяющие удобрения по ширине захвата.

Повышенный интерес многих фирм (Amasonen-Werke, Diadem, Lister и др.) к шнековым рабочим органам штанговых сеялок обусловлен тем, что шнеки обладают простотой конструкции, удобством обслуживания, надежностью выполнения технологического процесса и рядом других достоинств.

Шнековые сеялки выполняются с открытыми, закрытыми и кольцевыми распределительными устройствами. Каждое из этих распределительных устройств имеет свои положительные и отрицательные стороны.

Сеялки с открытым распределительным устройством выбрасывают излишки удобрений через окна в торцах кожуха, где могут устанавливаться различные разбрасывающие устройства, повышающие равномерность высева. В некоторых работах отмечается значительная сепарация туковых смесей, а при малых дозах высева транспортирование удобрений шнеками осуществляется порциями.

Работа сеялки с закрытым распределительным устройством заключается в том, что из бункера подается удобрений больше, чем высеивается аппаратами. В связи с этим, через некоторое время кожух шнека полностью заполняется удобрениями. После этого система управления отключает привод шнека, и удобрения в кожух не поступают. Как только уровень материала в кожухе шнека снизится, включается привод шнека и процесс повторяется.

Шнековые сеялки с замкнутыми распределительными устройствами оборудованы дополнительными наклонными шнеками, которые возвращают излишки удобрений обратно в бункер.

Закрытое распределительное устройство позволило отказаться от возвратных шнеков, что упростило технологическую схему машины. Однако наряду с достоинством есть и существенные недостатки. При работе с плохо сыпучими материалами в периферийной части распределительного устройства наблюдается накопление материала, которое приводит к закупорке распределительного устройства или даже его поломке. Затруднен также высев влажных материалов из-за залипания высевных отверстий.

Вибрационные, гравитационные и метательные штанговые сеялки не нашли такого широкого применения, как пневматические, ленточные, скребковые и шнековые, из-за ряда существенных недостатков.

Наиболее надежно технологический процесс внесения минеральных удобрений и их смесей выполняют шнековые штанговые сеялки.

Рассмотрим результаты аналитических исследований процесса транспортирования материала шнековыми рабочими органами.

Анализ работ по созданию шнековых высевающих аппаратов показывает, что на закономерности дозирования и равномерность высева оказывают влияние выбор технологической схемы, конструктивные и кинематические параметры шнека, физико-механические свойства минеральных удобрений и их смесей и ряд других факторов.

Исследования шнекового высевающего аппарата, выполненного по тупиковой схеме, показали, что эти технологические схемы не исключают накопления материала в периферийной части кожуха. Вследствие этого происходит разрушение гранул, приводящее к снижению эффективности использования удобрений, и возможно нарушение процесса дозирования из-за остатков шнека.

Обоснование параметров высевных окон выполнено в работе Харина В.К. Он предложил высевные окна выполнять в виде наклоненной под углом к горизонту щели. Предложенная автором форма кромки высевной щели позволила обеспечить неравномерность высева не более 12%. Однако при изменении вида удобрения или состава смеси необходимо корректировать положение высевной кромки, что снижает эффективность устройства.

Изменение положения высевных окон за счет поворота секционного кожуха аналогично решению, рассмотренному ранее, следовательно, оно имеет такие же недостатки.

При описании процесса транспортирования сыпучих материалов шнековыми высевающими аппаратами авторы рассмотренных работ основывались на зависимостях, полученных для горизонтальных винтовых транспортеров.

Подача шнекового транспортера определяется по формуле

$$Q = A \cdot \gamma \cdot V_M,$$

где A – площадь поперечного сечения материала в кожухе шнека;

V_M – средняя осевая скорость перемещения материала;

γ – насыпная плотность материала.

Применение данной зависимости усложняется тем, что осевая скорость V_M перемещения материала зависит от многих факторов. Материал в кожухе шнека, помимо поступательного движения, совершает винтообразное движение. Характер движения материала зависит от коэффициента заполнения кожуха удобрениями. В шнековых распределительных системах разгрузка кожуха происходит по всей длине, то есть в процессе движения участвует переменная по длине кожуха масса частиц. Аналитические исследования по определению осевой скорости V_M перемещения материала выполнялись по двум направлениям.

У некоторых авторов движение материала рассматривалось с точки зрения кинематики и динамики материальной точки. К недостаткам такого подхода к решению данной задачи необходимо отнести то, что из этих положений невозможно объяснить закономерности движения сыпучего материала в вертикальных и круто наклоненных шнековых транспортерах.

В работах С.К. Янчина предложено описывать движение материала в кожухе шнека как движение “сыпучего тела”. Под термином “сыпучим тело” С.К. Янчин понимает непрерывную среду, не имеющую внутренних сдвигов и находящуюся в объемном напряженном состоянии. Исходя из данного положения, получена формула для определения производительности шнекового транспортера, имеющая вид:

$$Q = 4,71(D^2 - d^2) \cdot \gamma \cdot S \cdot n \cdot \psi \cdot K_v, \quad (1.17)$$

где D – наружный диаметр шнека; d – диаметр вала;

S – шаг винта;

ψ – коэффициент заполнения кожуха материалом;

K_v – коэффициент осевой скорости, учитывающий уменьшение осевой скорости за счет вращения сыпучего тела совместно со шнеком.

При $\psi > (0,3 \dots 0,4)$ коэффициент K_v определяется по формуле:

$$K_v = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta},$$

где α – угол подъема винтовой линии по наружному диаметру шнека;

β – угол подъема винтовой линии, по которой движутся периферийные частицы сыпучего тела.

Омельченко А.А. и Куцын Л.М. предлагают объемный расход (производительность) Q определять по формуле:

$$Q = (k' V_{oc} \Delta V) \Delta l, \quad (1.18)$$

где $\Delta V / \Delta l$ – объем материала, приходящийся на единицу длины шнека;

k' – поправочный коэффициент, учитывающий отклонение осевой скорости от расчетной и количество груза увлекаемое потоком;

V_{oc} – скорость осевого перемещения груза.

На основании этой формулы получена зависимость объемной производительности спирально-винтового транспортера

$$Q = (\pi/4)k'D^2V_{oc}\psi \quad (1.19)$$

Сравнивая зависимости (1.17) и (1.19) видно, что (1.17) более полно описывает процесс транспортирования шнеком материала.

Недостатком этих зависимостей является то, что, они получены для условий перемещения материала с постоянным коэффициентом заполнения и требуют уточнений для описания технологического процесса распределительных систем.

Особенностью работы шнековых высевальных аппаратов заключается в том, что транспортируемый материал (минеральные удобрения или их смеси) должны высеваться по всей длине шнека. Разгрузка шнека производится через щель или через отверстия, а сам процесс разгрузки оказывает влияние на равномерность распределения удобрений.

Дозирующие системы, применяемые в штанговых сеялках, относятся к дозаторам гравитационного типа. Исследованиями установлено, что в наименьшей степени склонны к забиванию отверстия круглого сечения, расположенные в нижней части кожуха. Однако из-за необходимости регулирования нормы высева форму высевных отверстий выполняют в виде треугольника, ромба и других фигур.

Рассматривая вопросы истечения материала из отверстий, отмечается, что размеры отверстий должны быть больше минимального сводообразующего размера. Минимальный сводообразующий размер зависит от физико-механических свойств материала. Для минеральных удобрений и их смесей кроме этого необходимо учитывать возможность налипания удобрений, приводящее к изменению размеров отверстия и, как правило, к изменению дозы высеянных удобрений. Данное обстоятельство играет весьма важную роль при малых нормах высева. Технологии возделывания сельскохозяйственных культур предусматривают изменение нормы внесения удобрений в широком диапазоне от 50 до 1500 кг/га. Обеспечение такого широкого диапазона изменения норм внесения с требуемой неравномерностью дозирования гравитационными аппаратами весьма сложно. Поэтому совершенствование дозирующих систем и методов оценки их производительности является важной научной задачей.

Из проведенного анализа видно, что штанговые сеялки находят широкое применение за рубежом и начинают выпускаться в нашей стране. Учитывая необходимость повышения равномерности внесения минеральных удобрений при снижении объемов их выпуска и росте цен, исследования, направленные на совершенствование технологического процесса и рабочих органов штанговых сеялок являются актуальными.

Результаты исследований технологического процесса посева минеральных удобрений и туковых смесей штанговыми рабочими органами требуют систематизации и дополнения их данными о влиянии параметров рабо-

чих органов машин на закономерности распределения смесей. Ряд положений и выводов требуют проверки и обоснования для случая внесения смесей минеральных удобрений.

1.7. Анализ методов и технических средств управления распределением минеральных удобрений

Эффективность функционирования машин для внесения минеральных удобрений и их смесей в значительной степени зависит от точности настройки рабочих органов, наличия технических средств и методик настройки, оперативности выполнения данных операций.

При внесении минеральных удобрений и их смесей основными показателями являются равномерность распределения частиц по поверхности поля и соответствие высеянных удобрений агротехнической норме. При внесении туковых смесей, кроме того, необходимо обеспечить требуемое соотношение компонентов.

Рабочие органы машин для внесения минеральных удобрений и их смесей или не обеспечивают требуемых агротехникой показателей качества выполнения технологического процесса без выполнения настройки рабочих органов или выполняют его с низкой точностью. Этим объясняются работы проектных и исследовательских организаций, направленные на исследование, как рабочих органов, так и способов контроля и управления технологическим процессом внесения минеральных удобрений и их смесей.

Преыдушим обзором доказано, что на агротехнические показатели применения минеральных удобрений оказывают влияние способ внесения удобрений, конструктивная схема машины, тип распределительного рабочего и точность выполнения технологического процесса.

У машин, оборудованных распределительными рабочими органами броскового типа, на равномерность распределения удобрений по ширине засеваемой полосы значительное влияние оказывает положение сектора рассева центробежно-дискового аппарата, дальность полета частиц компонентов вдоль линии метания, закономерности распределения частиц по углу сектора рассева и вдоль линии метания, рельеф местности и ряд других факторов.

Совершенствование процесса внесения минеральных удобрений и их смесей рабочими органами броскового типа ведется в следующих направлениях:

- разработка рабочих органов, приспособленных к распределению гранулированных, кристаллических, порошкообразных минеральных удобрений и их смесей;
- снижение чувствительности рабочих органов к изменению фрикционных свойств удобрений;
- стабилизация угловой скорости распределительного рабочего органа;

- стабилизация направления движения агрегата;
- стабилизация ширины посева удобрений;
- разработка устройств контроля распределения частиц в секторе метания;
- снижения чувствительности рабочих органов к кренам и наклонам;
- разработка систем управления и контроля подачи материала на бросковый аппарат;
- разработка систем контроля обработанной площади;
- разработка микропроцессорных систем контроля и управления несколькими параметрами технологического процесса;
- разработка автоматизированных систем управления на базе микро-ЭВМ и другие.

На агротехнические показатели процесса внесения минеральных удобрений и их смесей рабочими органами штангового типа оказывают влияние тип рабочего органа, технологическая схема машины, точность подачи материала и его дозирования, внешние воздействия, рельеф поля и другие. Проведенный анализ результатов исследований показывает, что совершенствование технологического процесса внесения минеральных удобрений аппаратами штангового типа ведется в следующих направлениях:

- разработка рабочих органов, приспособленных к посеву минеральных удобрений и их смесей повышенной влажности;
- повышение стабильности процесса дозирования;
- повышение устойчивости технологического процесса при работе с уклонами;
- разработка систем контроля уровня материала в бункере или кузове машины;
- разработка систем учета доз внесения и обработанной площади;
- разработка бортовых микропроцессоров для контроля нескольких фаз технологического процесса и другие.

Качество выполнения технологического процесса внесения удобрений в значительной степени зависит от точности настройки рабочих органов машин. Кроме того, в процессе работы из-за необходимости изменения видов вносимых удобрений или условий работы агрегата (изменение влажности воздуха, рельефа поля, выходных характеристик трактора и влияния ряда других факторов) точность настройки машины нарушается.

Выполнение настройки рабочих органов, особенно центробежных, является трудоёмкой операцией. Для настройки распределительных рабочих органов центробежного типа отраслевой стандарт предусматривает проведение трехкратных контрольных проездов поперек, установленных в три ряда улавливателей. Попавшие в улавливатели удобрения взвешиваются, а затем, по соответствующей методике вычисляется неравномерность распределения частиц вдоль и поперек полосы посева. Затраты времени на выполнение данной операции могут быть весьма значительными (до 1,5...2,0 часов), а

учитывая, что данную операцию необходимо выполнять регулярно, затраты времени возрастают. Данные наблюдений показывают, что в хозяйствах настройку рабочих органов или не выполняют из-за отсутствия оборудования и сложности методики обработки данных, или настройка производится без соответствующего оборудования. В последнем случае точность настройки становится неопределенной и зависит от квалификации оператора. Для определения рабочей ширины рассева приходится пользоваться ориентировочными данными завода-изготовителя.

При внесении туковых смесей отраслевой стандарт требует выполнения химического анализа доз выпавших удобрений. По результатам химического анализа выполняется оценка распределения смеси и её компонентов. Затраты времени возрастают из-за необходимости выполнения большего объёма аналитических и вычислительных работ.

Так как у бросковых аппаратов распределение минеральные удобрения и компонентов туковой смеси по ширине рассева неравномерно, особенно по краям полосы рассева, то для обеспечения агротехнических требований равномерности, машины работают с перекрытием смежных проходов. При этом рабочая ширина рассева оказывается меньше общей ширины.

Так как распределение компонентов туковой смеси по ширине полосы рассева зависит от расслоения смеси при движении частиц по рабочему органу и при полете в воздушной среде, то задача определения и контроля рабочей ширины рассева становится сложной.

Этим подтверждается необходимость разработки методов и технических средств, обеспечивающих настройку, контроль и управления процесса внесения удобрений.

Следовательно, создание научных основ управления технологическим процессом внесения минеральных удобрений и разработка технических средств являются важной научной проблемой.

Такие работы ведутся многими проектными и научными организациями в нескольких направлениях.

Н.И. Шихов, Ю.А. Капустин, Э.А. Шакиров предложили комплекс технических средств «Анализатор качества внесения удобрений» (АКВУ), позволяющий выбирать рабочую ширину рассева и оценивать качество выполнения технологического процесса. Но так как применение этого комплекса требует размещения на поле улавливателей, то затраты времени составляют от 15 до 20 мин.

Данного недостатка лишены устройства, предложенные Козловским Е.В., Шестаковым В.М., Шиховым Н.И. и Капустиным Ю.А.. Они позволяют вести контроль распределения частиц по углу сектора рассева центробежного аппарата. Информация о распределении частиц, в виде эпюры, отражается на информационном табло. Табло расположено в кабине трактора. По виду эпюры механизатор судит о точности положения сектора рассева и при необходимости выполняет технологические регулировки. Так как контроль положе-

ния сектора рассева выполняется по визуальной оценке механизатора, то точность настройки будет зависеть от индивидуальных качеств. Визуальная оценка положения сектора рассева может давать погрешность до 10^0 .

Недостатком устройств, предназначенных для контроля точности выполнения технологических операций и настройки рабочих органов, является то, что регулировочные операции необходимо выполнять после остановки машины. Это вызывает дополнительные затраты времени, что нежелательно.

Известны технические решения, предназначенные для автоматического управления некоторыми операциями технологического процесса.

Кушель В.Ю., Чешун В.С., Войтиков А.В. предложили устройство, предназначенное для стабилизации прямолинейности движения машины и ряд устройств, предназначенных для стабилизации частоты вращения центробежного диска. Эти устройства позволяют стабилизировать ширину рассева и повысить точность соблюдения перекрытий при смежных проходах.

Якимов Ю.И., Волошин Н.И., Афанасьев В.А. предложили ряд устройств, позволяющих путем изменения кривизны лопаток центробежного диска управлять шириной рассева удобрений. Особенностью данных разработок является то, что они, по мнению авторов, позволяют исключить расслоение туковых смесей при их движении по диску.

Много работ посвящено разработке систем управления процессом дозирования, учета обработанной площади и нормы высева. Работы в этом направлении ведутся во многих странах мира: СССР, Россия, Польша, ФРГ, США и ряд других. Наибольшее число работ принадлежит фирме "Amazonen-Werke" (ФРГ). Устройства этой фирмы выполняют операции автоматического управления дозатором в зависимости от пройденного пути, нормы внесения и ширины рассева. Ряд технических решений выполнен на основе микропроцессорных систем. Устройства с микропроцессорным блоком управления выполняют автоматическое управление дозатором в зависимости от соотношения скорости движения машины к подаче. Данное соотношение устанавливается механизатором на пульте блока управления и поддерживается автоматически.

Высокие темпы внедрения микропроцессорных систем и микроЭВМ, повышение их надежности и малые габариты позволили расширить области их применения. Разработки (ФРГ, США, Франция, Польша и др) направлены на управления многими фазами процесса внесения удобрений, но не охватывают всего технологического процесса.

Необходимо отметить разработку системы внесения удобрений, предложенную Ortlipе (США). Она включает самоходную машину для внесения удобрений, снабженную бортовой ЭВМ, локатором, работающим по принципу навигационной системы "LORAN" и радаром. Бортовая ЭВМ, в память которой заложена почвенная карта поля, по данным навигационной системы вырабатывает управляющие сигналы для установления нормы высева, вида вносимых удобрений и выполняет контроль рабочих органов. Так как в дан-

ном случае вывод о требуемых питательных элементах и их дозах определяется по данным картографии, то требуемое количество питательных элементов установить весьма сложно, так как соотношение компонентов и их дозы на разных участках поля не остаются постоянными. Кроме того, данная система не выполняет контроля и управления процессом распределения частиц, а это приводит к тому, что даже если распределение удобрений и их смесей по общей площади удовлетворяет требованиям агротехники, то на отдельных участках распределение может быть неравномерным.

Анализ известных решений показывает, что большинство из них направлено на контроль и управление лишь некоторыми фазами технологического процесса и не затрагивают основных фаз процесса внесения минеральных удобрений и их смесей.

Это обусловлено малым числом исследований технологического процесса внесения минеральных удобрений и их смесей, выполненных с точки зрения автоматизации.

В “Концепции автоматизации агропромышленного комплекса“, разработанной учеными РАСХН под руководством академиков Кормановского Л.П., Краснощекова Н.В., Бородин И.Ф., Липковича Э.И. отмечается, что для повышения эффективности автоматизации необходима разработка интегрированных АСУТП, обеспечивающие комплексные функционально законченные решения задач управления. При этом проблема разработки аппаратных средств автоматизации сельскохозяйственного назначения должна решаться по следующим направлениям:

- обоснование параметров внешней среды, как исходных требований для разработки;
- обоснование параметров механических воздействий объектов автоматизации при их эксплуатации;
- разработка системы аппаратных средств автоматизации для АПК;
- разработка алгоритмов и программных средств.

Проблема внесения минеральных удобрений и их смесей заключается в том, что минеральные удобрения и, особенно их смеси, являются весьма чувствительным материалом к изменению параметров внешней среды, к воздействию рабочих органов, способам приготовления, транспортировки и внесения. Это является одной из основных причин, требующих разработки методов и технических средств контроля и управления процессом внесения. На необходимость оснащения машин системами контроля и управления указывают и технологии дифференцированного адаптированного к потребностям возделываемых культур внесения удобрений.

Обеспечение растений необходимыми элементами минерального питания достигается путем механизированного внесения односторонних, комплексных и смешанных удобрений. Эффективность применения минеральных удобрений, оценивается количественные и качественные показатели функционирования машин. К количественным показателям функционирования

машин относится их производительность, а к качественным показателям - заданная равномерность распределения питательных элементов по поверхности поля.

Распределение минеральных удобрений и их смесей по поверхности поля является сложным процессом, зависящим от ряда факторов. К ним относятся: способ внесения; способ приготовления туковой смеси; конструкция машины; тип распределительного рабочего органа; способ транспортирования материала от рабочего органа до поверхности поля; внешние воздействия окружающей среды; рельеф местности, фон поля и ряд других.

Факторы, влияющие на качественные показатели адаптивного применения минеральных удобрений и их смесей, а также их взаимосвязь приведена в виде иерархической структуры на рис. 1.9.

Агрохимические свойства минеральных удобрений оцениваются содержанием питательных элементов (N, P, K), их соотношением, размерами частиц и рядом других показателей.

Агрономическая ценность минеральных удобрений зависит от способности данного вида удобрений сохранять исходное содержание питательных элементов. Так, аммиачная селитра при увлажнении обладает повышенной склонностью к потере азота.

Кроме того, при приготовлении туковых смесей наблюдается химическое взаимодействие компонентов, приводящее не только к потере питательных элементов, но и к ухудшению физико-механических свойств смеси.

Приготовленные, путем механического смешивания, туковые смеси из порошкообразных и гранулированных удобрений в процессе хранения, перегрузок и транспортировки расслаиваются, то есть происходит изменение соотношения питательных элементов в разных частях объема.

Расслоение является одной из основных причин снижения эффективности применения туковых смесей. Вследствие расслоения смесей происходит неравномерное распределение частиц компонентов по ширине полосы посева. Интенсивность расслоения смесей в значительной степени зависит от принятой технологической схемы применения смесей, степени воздействия рабочих органов машин на всех этапах технологического процесса, технологической схемы машины, типов рабочих органов и режимов их работы и ряда других факторов.

Снижение влияния расслоения на эффективность внесения туковых смесей может быть достигнуто несколькими способами. Основными из них являются (рис. 1.9):

- приготовление туковых смесей при загрузке машины для внесения удобрений;
- приготовление туковой смеси распределительным рабочим органом;
- внесение каждого из компонентов отдельным рабочим органом.

Многими авторами отмечается высокая эффективность приготовления туковых смесей на складах или на специальных смесительных пунктах.

Существовавшие до 1995 года мощные тукосмесительные заводы в зернопроизводящих районах Ростовской области, Краснодарского и Ставропольского краев обеспечивали хозяйства большим ассортиментом туковых смесей.

Появление новых форм собственности привело к тому, что большинство из этих заводов перестали функционировать. Это обусловлено тем, что часть хозяйств распалась на более мелкие фермерские хозяйства, часть хозяйств потеряла финансовую независимость, а сами тукосмесительные пункты потеряли собственника. Следует ожидать, что в ближайшие годы на базе МТС будут возрождаться новые формы агрохимического обслуживания сельскохозяйственных предприятий. МТС должны будут выполнять работы, связанные с агрохимическим обследованием почв, выявлением потребности возделываемых культур в питательных элементах, реализовывать технологические процессы применения туковых смесей и осуществлять внесение удобрений. Заводы по производству туковых смесей уже создаются.

Анализ литературных источников позволяет заключить, что для обеспечения адаптированного к потребностям возделываемых культур внесения питательных элементов перспективным направлением является разработка технологических схем машин и их рабочих органов, выполняющих приготовление смесей непосредственно перед внесением их в почву или осуществляющих внесение компонентов без их предварительного смешивания.

Для распределения туковых смесей наибольшее распространение получили центробежные и штанговые аппараты, которые удовлетворительно вносят однородные удобрения, но не обеспечивают требуемого качества распределения частиц компонентов смеси по полю. Неудовлетворительное качество распределения туковых смесей по поверхности поля обусловлено тем, что основная часть теоретических, экспериментальных исследований и проектных работ выполнялась без учета склонности туковых смесей к расслоению, то есть туковая смесь рассматривалась как структура постоянного состава.

Недостаточная изученность закономерностей движения и распределения туковых смесей и их компонентов в технологических процессах внесения минеральных удобрений является сдерживающим фактором на пути совершенствования технологических процессов и рабочих органов машин. Однако в изучении этих рабочих органов накоплен большой аналитический и экспериментальный материал, который необходимо развить и дополнить с точки зрения условий функционирования этих рабочих органов в технологических процессах внесения туковых смесей.

Не использованным резервом совершенствования процесса адаптированного внесения удобрений является разработка научно обоснованных способов объективного контроля и управления технологическим процессом.

*Иерархическая структура показателей,
определяющих качество внесения
смесей минеральных удобрений*



Рис. 1.9

В этой связи разработка технологических процессов и рабочих органов машин, обеспечивающих адаптированное к видам минерального питания растений внесение удобрений и их смесей, обоснование способов контроля и управления технологическими процессами является важной научной проблемой.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ АДАПТИВНОГО ВНЕСЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

2.1. Направления совершенствования процессов адаптивного внесения минеральных удобрений

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию машин, обеспечивающих полную адаптацию технологических процессов к условиям функционирования, ведутся многими научными центрами во всех аграрно-развитых странах. В России эти работы интенсивно ведутся с 1998 года многими научными центрами во главе с ВИМ по проекту «Машинные технологии дифференцированного внесения удобрений». Как отмечает академик Л.П. Кормановский “...эта проблема настолько нова, фундаментальна и перспективна, что её решение возможно только на основе государственного финансирования”.

Сложность решения данной проблемы заключается:

- в недостаточной изученности системы «почва – минеральные удобрения – растение»;
- в отсутствии апробированных средств идентификации внутрипочвенного плодородия;
- в недостаточной изученности процессов взаимодействия многокомпонентных смесей с рабочими органами машин;
- в низком уровне автоматизации процессов внесения минеральных удобрений;
- в решении ряда других задач, связанных с приготовлением, хранением и транспортированием минеральных удобрений и их смесей.

В данной работе рассмотрены способы адаптации технологических процессов машин к требованиям минерального питания растений. Адаптированные по этому критерию технологические процессы машин и их рабочие органы предназначены для использования:

- в технологиях дифференцированного применения минеральных удобрений;
- в традиционных технологиях внесения предварительно смешанных удобрений;
- при внесении простых или сложных удобрений.

Решения проблемы адаптации технологических процессов машин к видам минерального питания растений выполнены в направлении совершенствования технологических схем машин, их рабочих органов и в обосновании способов контроля и управления процессами внесения минеральных удобрений (рис. 2.1), с учетом расслоения многокомпонентных смесей при их взаимодействии с рабочими органами и внешней средой.

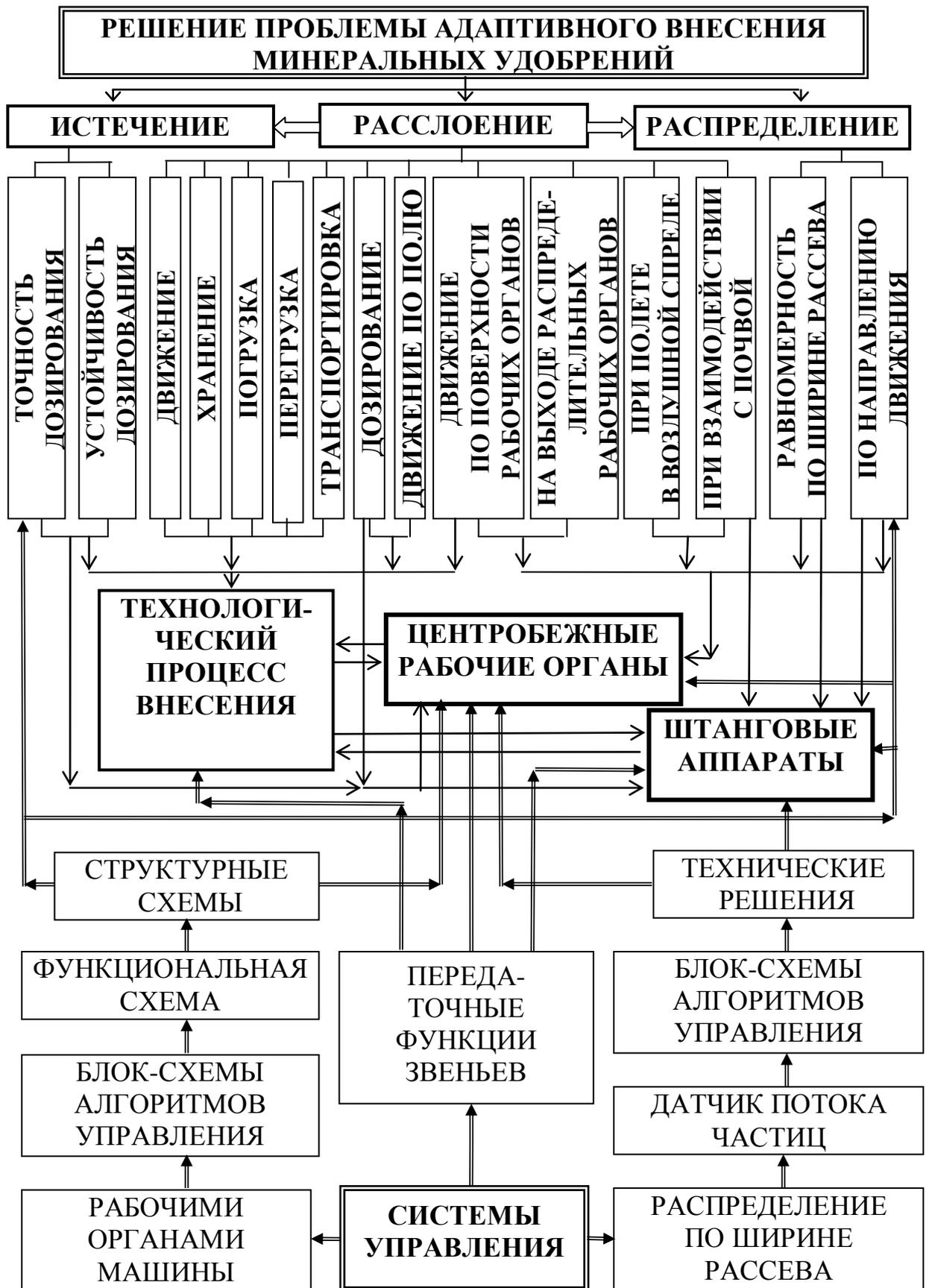


Рис. 2.1

Совершенствование рабочих органов проведено в направлениях:

- повышения равномерности и устойчивости дозирования многокомпонентных смесей при истечении из бункерных устройств;
- повышения равномерности распределения смесей и её компонентов по ширине посева, достигаемого разработкой новых рабочих органов;
- повышения производительности и качества выполнения технологических процессов за счет использования систем контроля и управления;
- обеспечения ресурсосбережения за счет уменьшения потерь удобрений при смешивании, перегрузках, транспортировке и в результате химического взаимодействия, а также за счет применения штанговых аппаратов, являющихся менее энергоемкими;
- повышения экологической безопасности технологических процессов за счет равномерного распределения требуемых доз, использования аппаратов для локального внесения удобрений, снижения загрязнения среды. Повышение эффективности функционирования машин и их рабочих органов в технологиях адаптивного внесения минеральных удобрений достигнуто путем:

1. Совершенствования процесса дозирования минеральных удобрений и туковых смесей.

2. Адаптации рабочих органов к видам удобрений и составу смесей (распределительные рабочие органы).

3. Использования многофункциональных рабочих органов, совмещающих операции смешивания и распределения (способ внесения двух видов минеральных удобрений без их предварительного смешивания и смеситель-разбрасыватель).

4. Применения штанговых аппаратов, расположенных в закрытом кожухе (шнековые и спирально-шнековые аппараты).

5. Управления рабочими органами машин (дозирующими элементами, распределительными рабочими органами).

Более подробному обоснованию методов совершенствования технических средств будут посвящены последующие разделы данной работы.

2.2. Общий алгоритм управления процессами адаптивного внесения минеральных удобрений

Особенностью функционирования машин в новых технологиях внесения минеральных удобрений является то, что они должны обеспечивать качественное распределение, как однородных удобрений, так и туковых смесей, адаптировано к требованиям возделываемых культур с учетом почвенного плодородия в пределах каждого поля. Эффективность функционирования машин для внесения минеральных удобрений при пестроте почвенного плодородия в пределах поля зависит от степени автоматизации операций кон-

троля и настройки рабочих органов. В перспективе машины должны оснащаться средствами для автоматического контроля и управления процессами:

- 1) определения содержания питательных элементов в почве;
- 2) определения доз внесения питательных элементов в зависимости от требований агротехники;
- 3) подачи компонентов в смесительное устройство или на рабочие органы;
- 4) распределения смеси и её компонентов по полю (дозы компонентов, равномерность внесения).

В настоящее время ведутся работы, направленные на создание систем для экспресс-анализа содержания питательных веществ в почве с помощью сканера, которые будут являться подсистемой общей системы управления технологическими процессами адаптивного внесения удобрений.

Одной из сложных задач, определяющих эффективность всего технологического процесса, является разработка методов и систем управления процессами распределения минеральных удобрений по полю.

Рассмотрим технологические процессы внесения минеральных удобрений и их смесей с точки зрения автоматического управления распределением материала по полю.

Технологический процесс внесения минеральных удобрений и их смесей является сложной, многоуровневой системой, подвержен влиянию случайных, технологических и управляющих воздействий. К случайным воздействиям будем относить те воздействия, которые в процессе выполнения технологического процесса могут принимать случайные значения. К технологическим воздействиям будем относить те воздействия, которые вызваны особенностями выполняемой операции (вид вносимых удобрений или состав смеси, норма высева, рабочая скорость машины и др.). Управляющими воздействиями являются те воздействия, которые позволяют управлять ходом технологического процесса.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, анализ технических решений, направленных на разработку систем контроля и управления позволяют обобщить эти воздействия и выявить возможные способы управления технологическим процессом внесения удобрений как бросковыми (табл. 2.1), так и штанговыми рабочими органами (табл. 2.2).

Анализ таблиц 2.1 и 2.2 показывает, что на технологический процесс внесения минеральных удобрений как бросковыми, так и штанговыми рабочими органами оказывают влияние многие факторы. Многообразие факторов, влияющих на закономерности распределения частиц по поверхности поля и их взаимосвязи, создают трудности в разработке математических моделей, описывающих процесс распределения частиц по поверхности поля с учетом всех внешних и управляющих воздействий.

Таблица 2.1. Факторы, определяющие качество выполнения технологического процесса адаптированного внесения минеральных удобрений метательными рабочими органами

Наименование	Воздействие на технологический процесс
1	2
Случайные воздействия:	
Физико-механические свойства удобрений:	
- средняя насыпная плотность	- колебания подачи смеси дозатором; - изменение равномерности дозирования; - колебания средней дозы внесения; - нарушение соотношения компонентов
- относительная влажность	- изменение аэродинамических свойств; - налипание частиц на рабочие поверхности; - потеря питательных элементов; - нарушение равномерности дозирования; - нарушение равномерности распределения.
- гранулометрический состав	- изменение соотношения компонентов; - изменение фрикционных характеристик; - изменение аэродинамических характеристик; - нарушение равномерности дозирования - нарушение равномерности распределения.
Природные и агроландшафтные:	
- поперечные склоны	- колебания угловой скорости рабочих органов; - нарушение равномерности дозирования; - изменение средней подачи смеси; - нарушение равномерности распределения
- продольные склоны	- нарушение равномерности дозирования; - нарушение равномерности распределения.
- невыравненности поля	- нарушение равномерности дозирования; - нарушение равномерности распределения.
- относительная влажность воздуха	- нарушение равномерности дозирования; - возможность налипания частиц на рабочие поверхности; - возможность потери питательных элементов

	Продолжение таблицы 2.1
1	2
Направление и скорость ветра	- нарушение равномерности распределения смеси; - нарушение равномерности распределения компонентов; -- нарушение заданного соотношения компонентов на поверхности поля.
Технологические воздействия:	
Состав туковой смеси:	
-изменение видов вносимых удобрений	- нарушение равномерности дозирования смеси; - нарушение равномерности дозирования компонентов; - химическое взаимодействия компонентов; - налипание частиц на рабочие поверхности; - потеря питательных элементов; - нарушение равномерности распределения.
-изменение соотношения компонентов	- нарушение равномерности дозирования смеси; - расслоение компонентов смеси; - нарушение равномерности дозирования компонентов; - нарушение равномерности распределения.
-изменение нормы высева	- нарушение равномерности дозирования смеси; - нарушение равномерности дозирования компонентов; - нарушение равномерности распределения.
Профессиональные качества оператора:	
- точность соблюдения скорости движения машины	- нарушение равномерности высева.
- точность соблюдения направления движения	- нарушение равномерности распределения; - образование необработанных участков; - несоответствие дозы внесения смеси.
- точность выбора рабочей ширины захвата машины	- несоответствие дозы внесения смеси; - нарушение равномерности распределения; - несоответствие дозы внесения смеси.
- точность настройки рабочих органов машины	- нарушение равномерности распределения; - нарушение средней дозы внесения; - отклонение соотношения компонентов

Продолжение таблицы 2.1	
1	2
Управляющие воздействия:	
-высота открытия дозирующей заслонки	- изменение средней дозы высева; - изменение соотношения компонентов; - изменение равномерности дозирования; - нарушение равномерности распределения
- место подачи на рабочий орган	- изменение дозы высева; - изменение равномерности распределения.
- изменение угловой скорости	- изменение равномерности распределения; - изменение рабочей ширины посева; - изменение дозы высева.
- изменение параметров рабочего органа	- изменение равномерности распределения; - изменение рабочей ширины посева; - изменение дозы высева.

Таблица 2.2. Факторы, определяющие качество выполнения технологического процесса адаптированного внесения минеральных удобрений штанговыми рабочими органами

Наименование показателей	Воздействие на технологический процесс
1	2
Случайные воздействия:	
Физико-механические свойства удобрений:	
- средняя насыпная плотность	- колебания подачи смеси дозатором; - изменение равномерности дозирования; - колебания средней дозы внесения
- относительная влажность	- налипание частиц на поверхности; - потеря питательных элементов; - нарушение равномерности дозирования.
- гранулометрический состав	- изменение соотношения компонентов; - нарушение равномерности дозирования.
Природные и агроландшафтные:	
- поперечные склоны	- колебания угловой скорости рабочих органов; - нарушение равномерности дозирования; - изменение средней подачи смеси.
- продольные склоны	- нарушение равномерности дозирования

Продолжение таблицы 2.2	
1	2
- невыравненности поля	- нарушение равномерности дозирования
- относительная влажность воздуха	- нарушение равномерности дозирования; - налипание частиц на рабочие поверхности; - потеря работоспособности; - потеря питательных элементов
Технологические воздействия:	
Состав туковой смеси:	
-изменение видов вносимых удобрений	- нарушение равномерности дозирования смеси; - нарушение равномерности дозирования компонентов; - химическое взаимодействия компонентов; - налипание частиц на рабочие поверхности; - потеря питательных элементов;
-изменение соотношения компонентов	- нарушение равномерности дозирования смеси; - расслоение компонентов смеси; - нарушение равномерности дозирования компонентов.
-изменение нормы высева	- нарушение равномерности дозирования смеси; - нарушение равномерности дозирования компонентов.
Профессиональные качества оператора:	
- точность соблюдения скорости движения машины	- нарушение равномерности высева; - нарушение средней дозы внесений.
- точность соблюдения направления движения	- нарушение равномерности высева; - образование необработанных участков
- точность настройки рабочих органов машины	- нарушение равномерности высева; - нарушение средней дозы удобрений; отклонение соотношения компонентов в смеси от заданного соотношения
Управляющие воздействия:	
Скорость перемещения материала вдоль оси штанги	- средняя доза высева; - равномерность дозирования
Размеры дозирующих отверстий	- доза высева; - равномерность дозирования
Расположение высевных отверстий относительно оси штанги	- равномерность дозирования

Отсутствие обобщающих математических моделей, средств объективного контроля и управления фазами технологического процесса не позволяет обеспечить требуемых агротехникой доз и равномерности распределения материала по поверхности поля. Механизатор, выполняя данную технологическую операцию, в основном руководствуется субъективным мнением, а как отмечалось выше, такая оценка приводит к грубым ошибкам и просчетам.

Из изложенного следует, что одним из путей повышения качества распределения минеральных удобрений и их смесей по поверхности поля и производительности агрегата является применение систем объективного контроля и управления.

Такие системы целесообразно объединять в автоматические системы управления (САУ) технологическим процессом.

На рис.2.2 приведен общий алгоритм системы управления процессом распределения минеральных удобрений и их смесей.

Рассмотрим основные операции и функции, выполняемые в каждом из блоков алгоритма управления процессом распределения минеральных удобрений и их смесей центробежными и штанговыми рабочими органами.

Блок 2 служит для ввода информации об объекте химизации. Информация должна содержать сведения об обеспеченности почв q_o питательными элементами. Эти сведения могут быть получены путем экспресс-анализа почв с помощью специального датчика, установленного на машине или в виде агрохимической карты поля (АХКП). Агрохимическая карта поля может быть сформирована на основании данных агрохимического обследования почв и представлена в виде матрицы. Если учетные площадки выбирать одинаковыми и с равным шагом, то каждой клетке матрицы будут соответствовать определенные координаты. Тогда каждая клетка матрицы (2.1) будут иметь сведения о координатах учетной площадки и содержании питательных элементов

$$q_o = \begin{vmatrix} q_{o(11)} & q_{o(12)} & \dots & q_{o(1i)} \\ q_{o(21)} & q_{o(22)} & \dots & q_{o(2i)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{o(j1)} & q_{o(j2)} & \dots & q_{o(ji)} \end{vmatrix}, \quad (2.1)$$

где $q_{o(ij)}$ – содержание питательных элементов в соответствующей клетке матрицы по каждому из компонентов.

Кроме этого в блок 2 должна быть введена информация о видах вносимых удобрений (BV), содержании в них питательных элементов (C_i) и допустимой неравномерности $[H_l]$ распределения частиц каждого из компонентов по поверхности поля.

**Алгоритм функционирования
систем управления процессами внесения
минеральных удобрений**

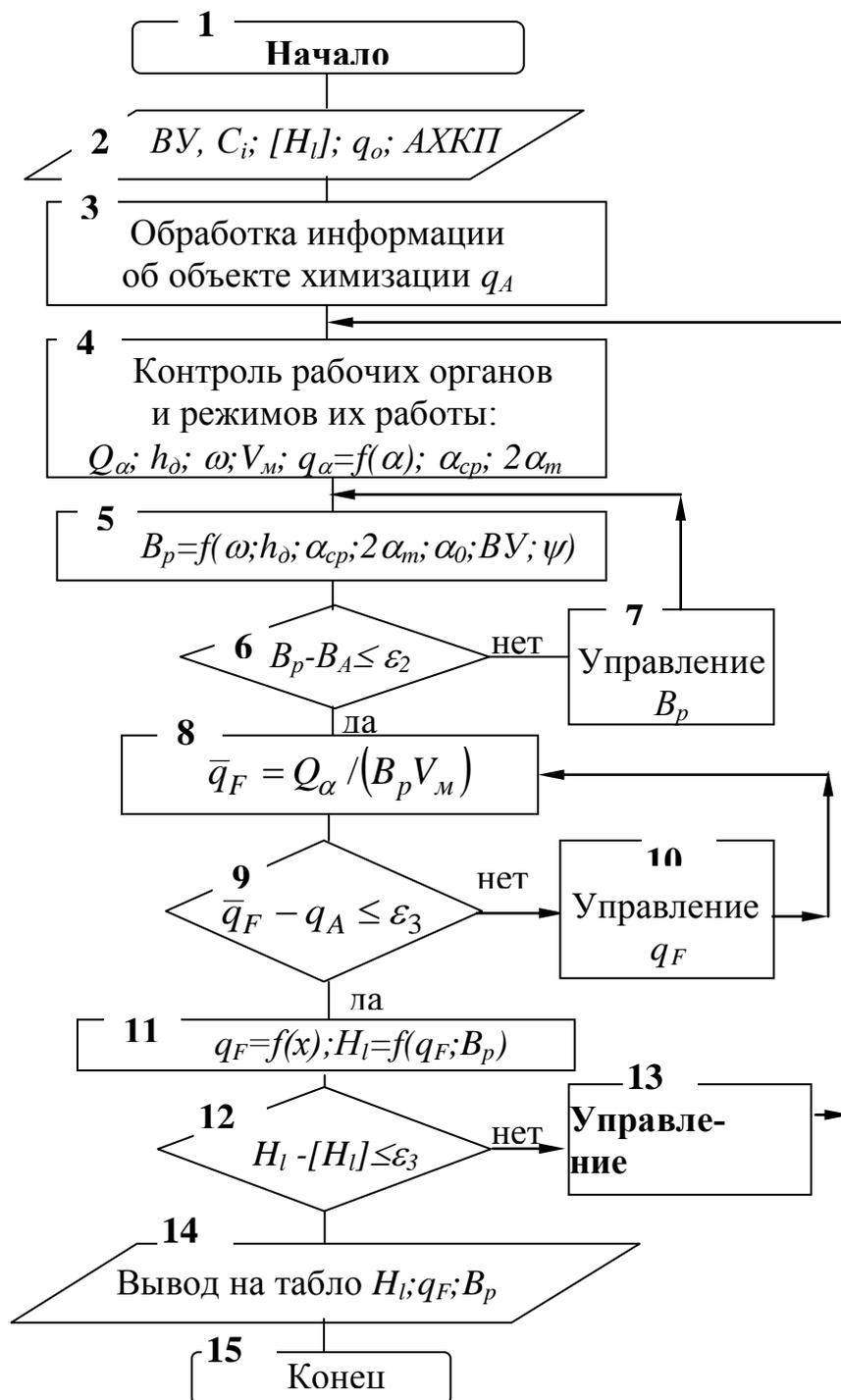


Рис. 2.2

Блок 3 обработки информации об объекте химизации осуществляет анализ АХКП или матрицы. В результате анализа определяется требуемая до-

за q_F внесения каждого питательного элемента

$$q_F = q_A - q_o, \quad (2.2)$$

где q_A – доза внесения данного питательного элемента, определённая из требований агротехники.

На основании (2.2) и вида вносимых удобрений (ВУ), с учетом содержания K_i в них питательных элементов, определяется необходимая доза q_F высева для каждого питательного элемента и соотношение компонентов C_i в смеси. Если машина броскового типа не оборудована ветрозащитным устройством, то в блок 3 должна поступать информация о направлении и скорости ветра.

Источником этой информации может служить датчик, вырабатывающий аналоговый или дискретный сигнал. Датчик должен быть установлен на машине или размещен на поле. При размещении датчика на поле машина для внесения удобрений должна иметь телекоммуникационные системы, аналогичные навигационной системе “LORAN”.

Блок 4 контроля рабочих органов и режимов их работы обрабатывает информацию, поступающую от соответствующих датчиков.

В зависимости от конструкции машины и типа распределительных рабочих органов контролю подлежат следующие физические величины:

- Q_α – подача материала из кузова или бункера в смесительную камеру или на распределительный рабочий орган;
- h_d – высота расположения распределительного рабочего органа над поверхностью поля (для машин, оборудованных центробежными аппаратами);
- ω – угловая скорость рабочих органов (центробежных дисков, вала подающего транспортера, вала смесителя и других);
- α_{cp} – требуемое положение угла сектора рассева броскового аппарата;
- $2\alpha_m$ – угол сектора рассева броскового аппарата;
- α_0 – угол наклона вектора скорости метания к горизонту;
- V_m – скорость движения машины;
- $q(\alpha)=f(\alpha)$ – функция плотности распределения частиц в секторе метания броскового аппарата.

Подача Q_α контролируется в зависимости от способа дозирования и типа машины. При объёмном дозировании у машин кузовного типа подача может быть вычислена, если определены скорость V_T движения ленты транспортера и высота h_z открытия дозирующей заслонки. При этом в блоке 4 должны содержаться сведения о физико-механических свойствах применяемых удобрений. Такой способ определения подачи может быть реализован с использованием зависимостей, предложенных С.И. Назаровым или по другим аналогичных этим зависимостям.

При объёмном дозировании материала у машин бункерного типа подача материала является функцией конструкции дозатора, вида дозируемого удобрения, площади дозирующего отверстия и ряда случайных воздействий

(влажность, амплитуда, частота и направление колебаний и другие). В некоторых конструкциях шнековых и спирально-шнековых аппаратов подача материала осуществляется путем выноса материала из бункера спиралью или шнеком. Подача в данном случае зависит от геометрических и кинематических характеристик рабочего органа. Если геометрические параметры рабочего органа в процессе эксплуатации машины не изменяются, то подача будет являться функцией частоты вращения спирали или шнека. Определение подачи возможно, если известна угловая скорость и вид удобрений (ВУ).

При, так называемом «весовом» способе дозирования для контроля подачи необходимо иметь датчик, регистрирующий массу движущегося потока частиц. Подача может быть определена с помощью тарифовочного графика (таблицы).

У машин, оборудованных центробежными рабочими органами, высота h_0 расположения диска над поверхностью поля является исходной для определения дальности метания частиц, а, следовательно, и для выявления закономерностей их распределения вдоль линии метания и по ширине рассева. Контроль высоты h_0 осуществляется датчиком линейных перемещений (рехордного или иного типов).

Угловая скорость ω рабочих органов является важным технологическим параметром. У машин с центробежными рабочими органами информация об угловой скорости диска позволяет прогнозировать ширину рассева. При этом варьированием угловой скоростью можно управлять рабочей шириной B_p рассева.

У машин, оборудованных штанговыми рабочими органами, применяют зависимый и независимый привод транспортирующей системы. При зависимом приводе угловая скорость пропорциональна скорости V_m движения машины. Вследствие этого угловая скорость оказывает влияние на подачу Q_α , а, следовательно, и на дозу высеваемых удобрений. Для управления равномерностью рассева и обеспечения заданной дозы q_F внесения удобрений необходимо иметь плавное регулирование угловой скорости. При независимом приводе контроль угловой скорости позволяет судить о нормальном выполнении технологического процесса. Регистрация угловой скорости осуществляется известными методами.

Контроль и определение функции q_α является необходимым условием прогнозирования распределения частиц по ширине полосы рассева аппаратами броскового типа. Определение функции q_α реализовано в ряде технических решений, подробно рассмотренных выше. Необходимо отметить, что эта функция представляется в виде эпюры, ординатами которой являются неопределенные величины. Это обусловлено тем, что датчики, регистрирующие распределение частиц по углу сектора рассева, фиксируют не функцию q_α , а функцию q_u интенсивности удара частиц о датчик. Сила удара, как известно, зависит не только от дозы, но и от скорости схода частиц с лопаток, которая

функционально связана со многими параметрами рабочего органа и физико-механическими свойствами частиц.

Функция интенсивности q_u будет пропорциональна функции q_α если конструкция аппарата обеспечивает условие постоянства скорости метания частиц по углу $2\alpha_m$ сектора рассева. Серийные центробежные рабочие органы не обеспечивают этого условия из-за расслоения смесей при движении по лопаткам. Это приводит к нарушению соответствия функций q_u и q_α . Покажем это, используя теорему о количестве движения для данного случая. Из теоремы следует:

$$mV_0 = Fdt = S, \quad (2.3)$$

где m – масса частицы, взаимодействующей с датчиком; F – сила удара частицы о датчик; S – импульс силы.

На выходе центробежного аппарата из-за расслоения смеси вначале сектора рассева преобладают частицы большего диаметра $d_{(н)}$, чем в конце сектора, то есть $d_{(к)} < d_{(н)}$. Кроме того, скорости метания в начале и в конце сектора рассева различны и связаны соотношением $V_{o(н)} > V_{o(к)}$. Учитывая, что массы частиц пропорциональны кубу их диаметра d , то на основании (2.3) получим:

$$\frac{S_{(н)}}{S_{(к)}} = \frac{d_{(н)}^3 V_{o(н)}}{d_{(к)}^3 V_{o(к)}},$$

то есть импульсы силы будут отличаться тем значительнее, чем интенсивнее аппарат расслаивает смеси.

Из изложенного выше следует, что необходима разработка рабочих органов, обеспечивающих выровненный по гранулометрическим и скоростным характеристикам поток частиц в секторе рассева. Таким требованиям удовлетворяет распределительный рабочий орган, описанный в данной работе.

По известной функции q_u могут быть получены значения среднего угла сектора рассева:

$$\text{- при аналоговом сигнале} \quad \alpha_{cp} = \frac{1}{Q_\alpha} \int_{-\alpha_m}^{\alpha_m} q_u d\alpha \quad (2.4)$$

$$\text{- при дискретном сигнале} \quad \alpha_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N q_u \alpha_i}{\sum q_u}, \quad (2.5)$$

где N – число измерений.

Угол $2\alpha_m$ определяется из условия обеспечения качественного распределения данного вида удобрений с учетом конструкции машины.

У машин, оборудованных штанговыми рабочими органами по функции q_u судят о выполнении технологического процесса и о равномерности

распределения частиц по полю. Причем необходимо отметить, что из-за малой скорости истечения удобрений из дозирующих отверстий соответствие функций q_u и q_F значительно выше, чем у машин с центробежными рабочими органами.

Блок 5 вычисления рабочей ширины рассева B_p удобрений обрабатывает информацию, полученную от соответствующих датчиков на основании которой определяется расчетная ширина отсева.

У машин, оборудованных центробежными рабочими органами, ширина отсева B_p является сложной функцией и зависит от организации технологического процесса, конструктивных и кинематических параметров рабочего органа, и ряда случайных воздействий.

К конструктивным и кинематическим параметрам относятся: радиус R и угловая скорость ω диска; углы ψ постановки лопаток; угол α_0 наклона лопаток к горизонту; высоты h_0 установки диска над поверхностью поля.

Технологическими параметрами, влияющими на ширину B_p отсева, являются: вид вносимых удобрений; положение сектора отсева относительно оси движения машины, определяемое углом α_{cp} ; угол $2\alpha_m$ сектора отсева; способ движения агрегата.

К случайным воздействиям, влияющим на распределение частиц удобрений по поверхности поля, относятся: колебания машины, скорость и направление ветра и другие.

Учитывая сложность данной зависимости, задача определения ширины B_p отсева может быть решена с помощью эмпирических соотношений или с помощью зависимостей, предложенных В.А. Черноволовым. При использовании таких зависимостей в блоке 5 должна содержаться информация о функциях p_ρ плотности распределения частиц вдоль линии метания каждого из вносимых удобрений.

Учитывая, что распределение частиц вдоль линии метания близко к нормальному распределению вероятностей, то для описания функций p_ρ достаточно хранить сведения о математическом ожидании ρ_{cp} дальностей метания и среднеквадратическом отклонении σ_ρ дальностей метания. Это позволяет значительно сократить объем хранимой информации, но увеличивает объем вычислительных операций. Используя ранее полученную информацию о подаче Q_α и функции q_u интенсивности распределения частиц по углу сектора отсева определяется доза q_F высеянных удобрений. Для этого функцию q_u необходимо преобразовать в функцию p_α .

Пусть функция q_u имеет вид выпуклой кривой (рис. 2.3) характеризуемая средним углом метания α_{cp} и углом сектора контроля $2\alpha_k$.

Датчик интенсивности потока частиц перемещается по углу $2\alpha_k$ сектора контроля. Система контроля начинает регистрацию сигнала от датчика в точке "А" и заканчивает в точке "В". Сигналы регистрируются через задан-

ный промежуток Δt времени (угол $\Delta\alpha$ поворота датчика) Так формируется функция (гистограмма) интенсивности потока частиц.

Тогда
$$P_\alpha = \frac{|q_u \Delta\alpha_i|}{\sum |q_u \Delta\alpha_i|}$$

Импульсы, поступающие от датчика на дуге AC записываются в одни ячейки памяти Π_1 , а поступающие на дуге CB в другие - Π_2 . Сигнал об изменении записи импульсов поступает

от датчика, расположенного в точке C . Содержимое ячеек памяти суммируется, а затем определяется их разность. Разность сумм сравнивается с допустимой ошибкой ε , то есть

$$\sum \Pi_1 - \sum \Pi_2 \leq \varepsilon. \quad (2.6)$$

Если условие (2.6) не выполняется, то система вырабатывает сигнал на управление положением сектора рассева. Локальные системы управления положением сектора

К анализу функции интенсивности потока частиц

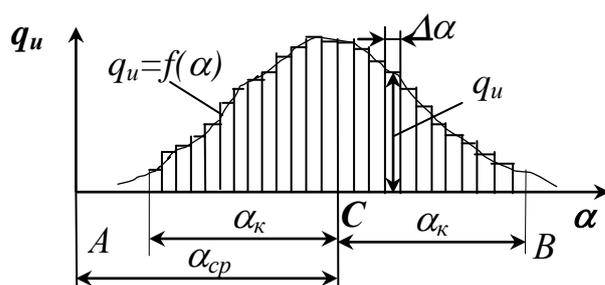


Рис. 2.3

рассева будут рассмотрены ниже.

При выполнении условия (2.6) по известным методикам (при заданной неравномерности рассева и принятом способе движения агрегата) вычисляется рабочая ширина B_p рассева.

Задача выбора наиболее приемлемого способа определения ширины B_p должна решаться разработчиками систем управления. При этом необходимо учитывать, что использование зависимостей (1.21) позволяет не только определить ширину B_p рассева, но и дозу q_F выпавших удобрений, то есть получить функцию $q_F=f(x)$ распределения удобрений по ширине полосы рассева. Функция $q_F=f(x)$ в дальнейшем может быть использована для решения других задач управления технологическим процессом внесения удобрений и их смесей.

У машин с фиксированной шириной рассева значение B_p должно быть введено в блоке 2 ввода информации или храниться в блоке 5.

Блок 6 сравнивает расчетное значение ширины B_p с шириной B_A рассева, заданной из условий агротехники. Если условие не выполняется, сигнал об этом с соответствующим знаком передается в блок 7 управления шириной рассева. У центробежных рабочих органов управление шириной рассева можно осуществлять за счет изменения:

- углов ψ_R постановки лопаток;
- высоты h_δ расположения диска над поверхностью поля;
- угла α_0 наклона лопаток к горизонту;

- угловой скорости ω диска.

Анализ закономерностей движения частиц по лопаткам центробежного диска показывает, что при управлении шириной рассева за счет изменения углов ψ_R и α_0 необходимо учитывать их влияние на положение и величину сектора рассева. Кроме того, изменение углов ψ_R и α_0 в сторону положительных значений способствует росту степени расслоения смесей.

Управление шириной рассева за счет изменения высоты h_0 расположения диска над поверхностью поля может быть легко реализовано у навесных машин для внесения удобрений (типа НРУ-0,5 и аналогичных им). У кузовных машин управление высотой h_0 является сложной задачей и требует создания технических устройств, обеспечивающих сохранение заданных координат и формы зоны питания.

Наиболее простым и легко реализуемым способом является управления шириной рассева за счет изменения угловой скорости ω диска. Результаты экспериментальных исследований показывают, что изменение угловой скорости ω диска не влияет на положение и величину сектора рассева. Это является важным преимуществом данного способа управления.

Анализ зависимостей средних дальностей ρ_{cp} полета частиц и среднеквадратических отклонений σ_p дальностей от скорости V_0 , показывает, что изменение этих показателей в диапазоне рабочих скоростей метания может быть описано линейными функциями. Это позволяет по полученной разности выработать команду на увеличение или уменьшение угловой скорости ω диска.

Управление угловой скоростью рабочих органов наиболее эффективно реализуется с помощью управляемого электропривода. Это упрощает конструкцию исполнительных органов систем автоматизации.

При выполнении условия $B_p - B_A \leq \varepsilon_2$ блок 8 производит вычисление действительной дозы q_F , а затем блок 9 выполняет сравнение $\bar{q}_F - q_A \leq \varepsilon_3$, где ε_3 – допускаемое отклонение расчетной дозы q_F от заданной агротехникой q_A .

Если условие сравнения в блоке 9 не выполняется, управление передается в блок 10. Так как средняя доза \bar{q}_F вносимых удобрений зависит от ширины B_p захвата машины и подачи Q_α , то в зависимости от конструкции машины и тапа рабочих органов может быть принят один из вариантов управления дозой.

При внесении минеральных удобрений и их смесей штанговыми рабочими органами или центробежными аппаратами, оборудованными ветрозащитными или распределительными системами управление q_F можно осуществлять за счет изменения подачи Q_α .

При работе центробежных рабочих органов без ветрозащиты управление средней дозой может быть осуществлено как за счет изменения подачи, так и за счет изменения рабочей ширины рассева, то есть за счет изменения

перекрытия ΔB при смежных проходах. В зависимости от выбранного способа управления дозой определяется структура и содержание исполнительного механизма.

Выбор способа управления средней дозой q_F внесения удобрений должен выполняться с учетом того, что увеличение подачи Q_α удобрений на лопатки центробежного диска приводит к увеличению угла сектора рассева, а изменение перекрытия ΔB при смежных проходах вызывает соответствующее изменение равномерности распределения частиц по полю. Если при увеличении перекрытия равномерность распределения повышается, что следует считать положительным явлением, то при уменьшении перекрытия неравномерность возрастает. Это может привести к нарушению агротехнических требований. Из этого следует, что управление средней дозой внесения удобрений целесообразно осуществлять за счет изменения подачи.

Если условие сравнения в блоке 9 выполняется, то управление передается в 11 вычисления функций $q_F=f(x)$ дозы и $H_l=f(q_F;B_p)$ неравномерности распределения удобрений по ширине рассева. В блоке 12 показатель расчетной неравномерности распределения сравнивается с заданной (допустимой) неравномерностью, то есть выполняется проверка условия $H_l - |H_l| \leq \varepsilon_3$, где ε_3 – заданная ошибка.

В зависимости от знака ε_3 в блоке 13 вырабатывается сигнал на управление неравномерностью распределения. При выполнении условия сравнения в блоке 12 процесс управления передается блоку 14, который отображает на информационном табло основную информацию о показателе неравномерности, дозе и рабочей ширине рассева. При необходимости данная информация может быть использована для оценки других показателей (производительность за заданный промежуток времени, расход удобрений и др.).

Рассмотренный алгоритм управления процессом внесения удобрений (рис. 2.2) является общим. Для машин оборудованных различными типами рабочих органов данный алгоритм может быть дополнен или сокращен за счет добавления или исключения из него ряда технологических операций.

С целью выявления рациональных технологических схем машин для адаптированного внесения минеральных удобрений необходимо рассмотреть функционирование рабочих органов в процессах одновременного внесения нескольких видов минеральных удобрений или туковых смесей.

2.3. Влияние уровня адаптации технологического процесса на производительность машин

Основными показателями функционирования машин для внесения минеральных удобрений являются качество выполнения технологической операции и производительность.

Обеспечение качественных показателей распределения минеральных удобрений и их смесей по ширине рассева требует выполнения ряда технологических регулировок. К числу технологических регулировок относятся настройка дозаторов на заданную норму внесения и настройка распределительных рабочих органов. У машин, оборудованных центробежно-дисковыми рабочими органами, настройка аппаратов заключается в выборе требуемого положения и угла сектора рассева. Распределительные рабочие органы штангового типа настраиваются на равномерность дозирования и пропускную способность высевных отверстий.

Отсутствие на машинах технических средств и систем объективного контроля и управления является одной из причин низкой эффективности использования машинных технологий. Это проявляется в том, что для достижения высокой производительности оператор не выполняет технологические настройки качественно или затрачивается много времени на их выполнение. Если в первом случае качество выполнения технологического процесса не удовлетворяет требованиям агротехники, то во втором случае резко снижается производительность машины.

Необходимость оснащения машин системами объективного контроля и управления особенно резко выявляется в технологиях дифференцированного внесения удобрений. С учетом пестроты почвенного плодородия в пределах поля необходимое число технологических регулировок колеблется от одной до нескольких десятков. Кроме того, технологические регулировки необходимо выполнять при внесении удобрений на другом поле или под другие культуры.

Рассмотрим зависимость производительности машины от затрат времени для выполнения технологических регулировок, применительно к машинам с центробежно-дисковыми аппаратами. Производительность агрегата за 1 час сменного времени определим по формуле

$$W = \frac{1 - (t_{m.o.} + t_{физ.})}{\frac{1}{0,1B_p V_m} + \frac{t_{нов.}}{21,6B_p F_n^{0,7}} + \frac{q_F}{\lambda} + \frac{2q_F S}{Q_p V_x} + \frac{q_F t_{под.}}{Q_p} + \frac{t_{неп.}}{F_n}} ga / ч, \quad (2.7)$$

где $t_{m.o.}$ и $t_{физ.}$ – продолжительность остановок (ч) на проведение технического обслуживания, настроек машины и по физиологическим потребностям, приходящихся на 1 ч работы; B_p – рабочая ширина захвата, м; V_m – рабочая скорость агрегата км/ч; $t_{нов.}$ – время одного поворота агрегата, с; F_n – площадь поля, га; q_F – норма внесения, кг/га; λ – производительность погрузчика, кг/ч; S – расстояние до места загрузки, км; Q_p – грузоподъемность машины, кг; V_x – транспортная скорость, км/ч; $t_{под.}$ – время одного подъезда к погрузчику, с; $t_{неп.}$ – время переезда с поля на поле, с.

Входящее в (2.7) время $t_{m.o.}$ включает продолжительность остановок на проведение технического ухода $t_{m.y.}$ и продолжительность остановок, связан-

ных с настройкой дозирующих t_d и распределительных t_p рабочих органов машины, то есть

$$t_{m.o.} = t_{m.y.} + t_d + t_p. \quad (2.8)$$

Принимаем время $t_{m.y.} = 0,45$ ч постоянным в течение смены, а время настройки дозирующих t_d и распределительных t_p рабочих органов зависимым от числа перенастроек. По данным /268/ время $(t_d + t_p)$ одной перенастройки машины для разбросного внесения удобрений, оборудованной серийными рабочими органами, составляет не менее 0,5 ч.

При использовании распределительных рабочих органов адаптированных к видам вносимых удобрений время $t_p = 0$, а время $t_d = 0,1$ ч.

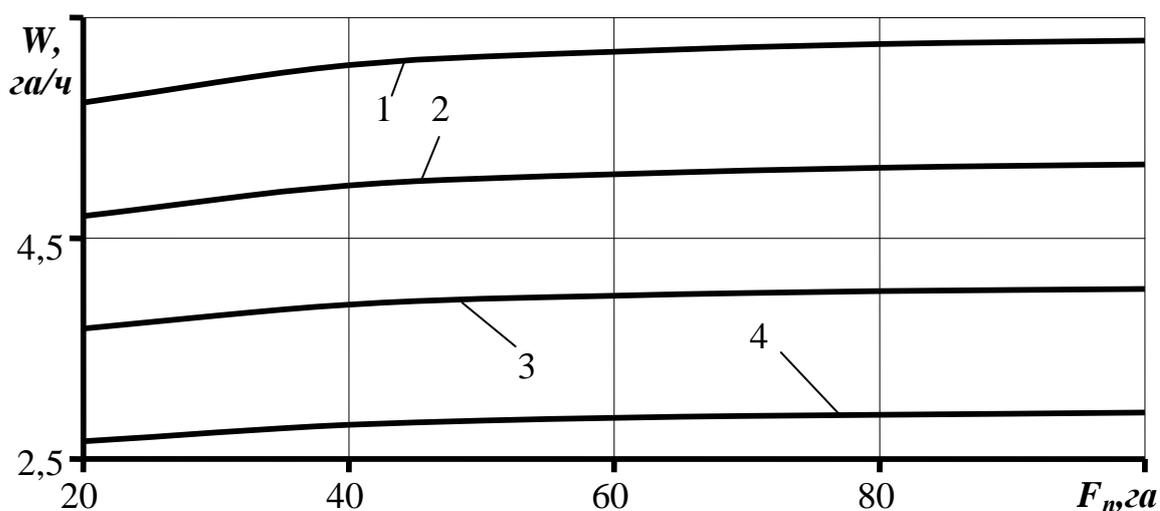
Для машины, оборудованной средствами автоматического контроля и управления процессами дозирования и распределения, время $(t_d + t_p) = 0$.

Анализ рис. 2.4 показывает, что с увеличением площади F_n поля производительность W агрегата возрастает при любом числе технологических настроек. С увеличением площади поля от 20 до 100 га производительность агрегата возрастает в среднем на 10% при любом числе технологических регулировок.

При дифференцированном внесении удобрений с увеличением числа технологических регулировок производительность агрегата снижается. Так, при площади поля 20 га при одной технологической регулировке производительность агрегата составила 5,73 га/ч, при трех – 4,70, при 5 – 3,68, а при семи – 2,66 га/ч. То есть снижение производительности составляет от 1,22 до 2,15 раза.

Таким образом, использование центробежно-дисковых рабочих органов в технологиях дифференцированного применения минеральных удобрений

Влияние площади поля и числа регулировок на производительность агрегата



Кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют 1, 3, 5, 7 –технологическим регулировкам рабочих органов

Рис. 2.4

без их адаптации к видам вносимых удобрений приводит к резкому снижению производительности агрегата.

Разработка рабочих органов, адаптированных к видам минеральных удобрений, позволяет повысить производительность агрегата (рис. 2.5).

**Зависимость производительности агрегата
от числа технологических регулировок
при разных уровнях адаптации процесса**



Рис. 2.5

Применение адаптированных рабочих органов (рис. 2.5 пунктирная линия) позволяет повысить производительность агрегата от 1,10 до 2,12 раза. Адаптация рабочих органов к видам минеральных удобрений может осуществляться как за счет разработки новых распределительных аппаратов, так и за счет использования локальных систем автоматизации.

Оснащение машин автоматизированными системами контроля и управления (рис. 2.5, штрихпунктирная линия) позволяет обеспечить максимальную производительность агрегата. Увеличение производительности агрегата по сравнению с серийными машинами составляет от 1,07 до 2,31 раза.

При реализации других процессов количество технологических регулировок возрастает, а, следовательно, производительность агрегата будет ниже, чем у выше рассмотренного процесса.

Затраты времени, связанные с технологическими регулировками, у машин для локального внесения минеральных удобрений зависят от конструкции распределительного рабочего органа и уровня автоматизации. У таких машин число дозирующих отверстий составляет от 2 до 7 на один метр ши-

рины захвата машины. Следовательно, настройка большого числа дозаторов на заданную норму высева требует значительных затрат времени, соизмеримых со временем настройки центробежных аппаратов.

Таким образом, разработка рабочих органов, адаптированных к видам вносимых удобрений и систем автоматизированного контроля и управления является актуальной научной проблемой. Решение этой проблемы позволит обеспечить качественное распределение удобрений с одновременным ростом производительности машин.

2.4. Обоснование технологических процессов адаптивного внесения минеральных удобрений

Рассмотрим технологические процессы одновременного внесения нескольких видов минеральных удобрений как систему, функционирование которой происходит при рассеве механически созданных туковых смесей, представив процессы в виде направленного графа, вершинам которого соответствуют этапы процессов, а ребрам – влияние расслоения смесей на соотношение компонентов. Наибольшее число ребер содержит перевалочная технология. Она включает следующие последовательно протекающие этапы (рис. 2.6):

Технологические процессы одновременного внесения нескольких видов минеральных удобрений

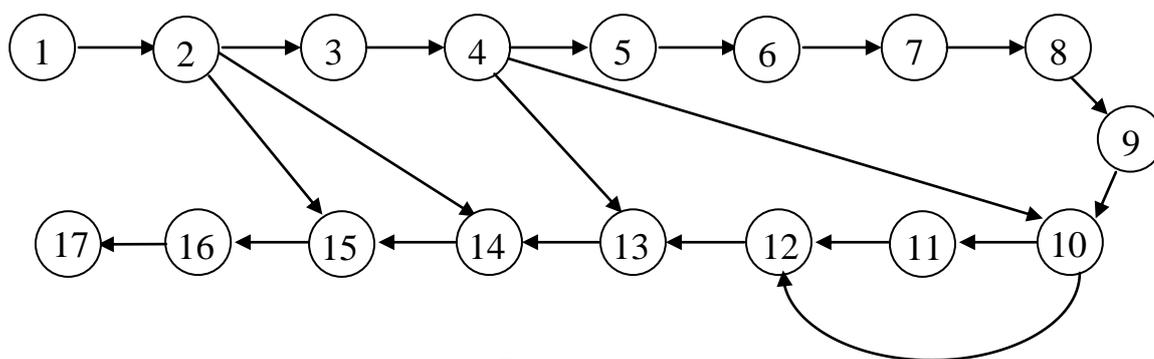


Рис. 2.6

1 – исходные компоненты (N, P, K); 2 – дозирование компонентов; 3 – смешивание компонентов; 4 – выгрузка туковой смеси; 5 – загрузка смеси в транспортное средство; 6 – транспортирование смеси к глубинному складу; 7 – перегрузка смеси в хранилище; 8 – хранение смеси; 9 – выгрузка смеси; 10 – погрузка в машину для внесения смеси; 11 – транспортирование к полю; 12 – движение машины по полю; 13 – дозирование тукосмеси; 14 – подача смеси к распределительному рабочему органу; 15 – движение смеси в распределительном рабочем органе; 16 – выгрузка смеси; 17 – внесение смеси в почву.

тельном рабочем органе; 16 – распределение смеси на выходе распределительного рабочего органа; 17 – распределение компонентов по поверхности поля.

Перевалочная технология, содержащая ребра 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9 – 10 – 11 – 12 – 13 – 14 – 15 – 16 – 17 является менее перспективной из-за значительного влияния расслоения на качество распределения смеси.

Прямоточная технология не содержит ребра 5 – 9, чем исключается расслоение смеси при погрузочно-разгрузочных работах и транспортировке к глубинному складу. Это является положительным свойством данной технологической схемы. Близкие показатели по расслоению туковых смесей к прямоточной технологии обеспечиваются при использовании машин, объединяющих смесительные и распределительные рабочие органы /51, 180/. Кроме устранения расслоения на этапах 5 – 9, они исключают расслоение смесей при движении машины по полю (ребро 11). Недостатком таких машин является сложность конструкции и большое число технологических регулировок, связанных с настройкой дозирующих, смесительных и распределительных рабочих органов. Такие технологические схемы машин могут быть использованы в технологиях координатного земледелия при автоматизации дозирующих, смесительных и распределительных систем.

Исключение расслоения туковых смесей на этапах 5 – 12 достигается при использовании мобильных смесителей-загрузчиков удобрений (типа СЗУ-20), обеспечивающих загрузку машины в поле туковой смесью заданного состава. Реализация такой технологической схемы сдерживается отсутствием таких машин в хозяйствах.

Перспективными направлениями в создании машин, объединяющих процессы распределения и смешивания, являются технические решения, в которых распределение и смешивание компонентов выполняется одним рабочим органом. Реализация такого технологического процесса исключает расслоение смесей на этапах 3 – 13. При автоматизации процессов дозирования и распределения эта технологическая схема машины является перспективной для использования в технологиях координатного земледелия.

Другим решением проблемы снижения влияния расслоения на качество распределения смеси по полю являются технологические схемы машин, обеспечивающие распределение каждого из компонентов отдельным рабочим органом. Такие машины имеют число бункеров и распределительных рабочих органов, равное числу вносимых компонентов. Это усложняет конструкцию машины, число технологических регулировок возрастает. Такое решение аналогично размещению 3-4 машин на одной базе. Показатели качества распределения близки к показателям, достигаемым при последовательном распределении каждого из компонентов.

Рассмотренные технологические процессы реализуются в традиционных технологиях – обеспечивающих внесение заданной дозы питательных элементов для отдельного поля. Для функционирования рассмотренных тех-

нических средств в технологиях координатного земледелия необходимо выявить возможность их адаптации к потребностям минерального питания растений с учетом неоднородности почвенного плодородия.

Для адаптации технических средств к условиям функционирования в технологиях координатного земледелия выполним топологический анализ технологических процессов.

Анализ рис. 2.5 показывает, что наименьший путь, а, следовательно, и наименьшее влияние расслоения на распределение смеси обеспечивается по пути 1 – 2 – 15 – 16 – 17. Близкое качество внесения нескольких видов минеральных удобрений одновременно можно достигнуть при движении по пути 1 – 2 – 14 – 15 – 16 – 17. Реализация этих технологических схем возможна при внесении каждого из компонентов отдельным рабочим органом или при наличии рабочих органов, совмещающих операции смешивания и распределения. Первый вариант менее предпочтителен из-за сложности конструкции и обслуживания, а также высокой стоимости машины.

Путь 1 – 2 – 3 – 4 – 13 – 14 – 15 – 16 – 17 реализуется машинами, оборудованными смесительными и распределительными рабочими органами.

При внесении туковых смесей приготовленных на тукосмесительных заводах предпочтительнее прямоточная технология, так в этом случае исключаются фазы 5 – 9. Рассмотрение данного пути (1 – 2 – 3 – 4 – 10 – 11 – 12 – 13 – 14 – 15 – 16 – 17) обусловлено тем, что такая технологическая схема является наиболее распространенной в традиционных технологиях многих стран мира. Распространение этой технологии вызвано тем, что для внесения туковых смесей используются те же машины, что и для внесения однородных удобрений.

Исключение расслоения при транспортировании смеси к полю реализуется по пути 1 – 2 – 3 – 4 – 10 – 12 – 13 – 14 – 15 – 16 – 17 с помощью смесителей-загрузчиков.

Для выбора рациональной технологической схемы и обоснования направлений совершенствования технических средств необходимо установить влияние расслоения на соотношение компонентов для каждого из ребер. Упростим модель за счет отбрасывания наиболее длинного пути (рис. 2.7).

На упрощенной модели (рис. 2.7) помимо отмеченных путей пунктирными линиями указаны возможные обратные связи, реализуемые системами управления: (16 – 1) – управление дозами вносимых компонентов; (16 – 14) – управление подачей материала на рабочий орган; (16 – 13) – управление подачей смеси. Реализация этих обратных связей обеспечивает адаптацию процессов к видам минерального питания растений.

Отсутствие априорной информации об интенсивности расслоения смеси на всех этапах технологического процесса не позволяет выполнить сравнительную оценку рассматриваемой модели. Расслоение смесей при погрузке, транспортировке, хранении оценим, используя, как экспертные оценки, результаты исследований.

Упрощенные модели технологических процессов

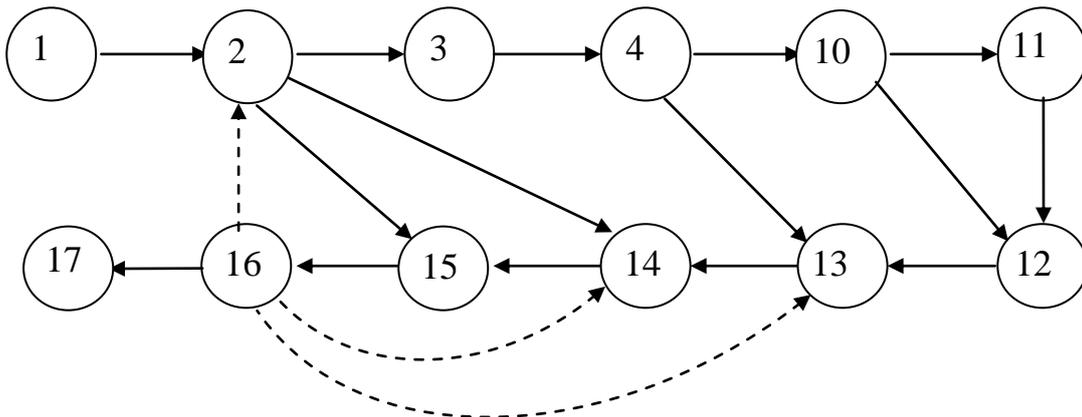


Рис. 2.7

Изучив процессы истечения и движения смесей по рабочим поверхностям машин, определим влияние расслоения на качественные показатели распределения туковых смесей. Длины ребер (рис. 2.8) примем пропорциональными изменению соотношения компонентов, то есть

К обоснованию рациональных технологических процессов адаптивного внесения минеральных удобрений

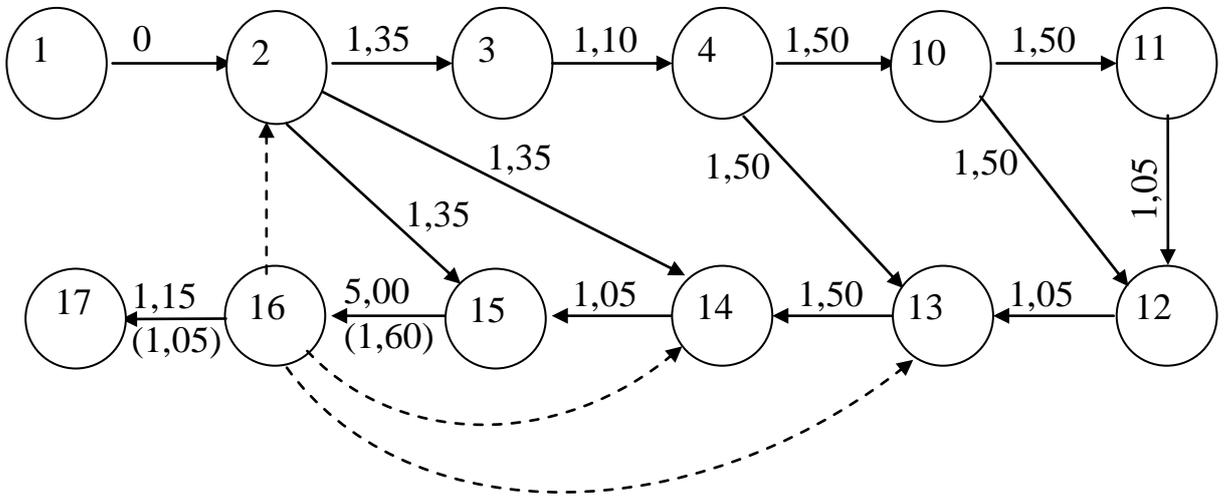


Рис. 2.8

$$L_{c(n-(n+1))} = k_i \cdot t_i = q_{F(i)} / q_{F(j)} = C_{i,j},$$

где n - номер этапа (вершины); k_n - коэффициент расслоения смеси при выполнении n -го этапа; t_i - время выполнения n -го этапа; $q_{F(i)}$, $q_{F(j)}$ - дозы i -го, j -го компонентов; $C_{i,j}$ - соотношение компонентов.

$$\text{Условие оптимальности процесса } \sum_{i=1}^n L_{C(i)} \rightarrow \min. \quad (2.9)$$

На рис. 2.8 в скобках приведены длины ребер для штанговых рабочих органов, а пунктирными линиями указаны направления управляющих воздействий.

Перечень технологических операций и их весовые доли приведены в таблице 2.3. Анализ рис. 2.8 позволяет установить влияние расслоения смесей на качество выполнения технологического процесса и выявить направления совершенствования технических средств.

Таблица 2.3. Перечень операций технологических процессов одновременного внесения нескольких видов минеральных удобрений

Дуги графа	Операции технологического процесса	Техническое средство для реализации	Весовая доля
2-3	Дозирование компонентов	Объёмный дозатор	1,35
3-4	Смешивание компонентов	Шнековый смеситель	1,10
4-10	Выгрузка смеси	Транспортер ПКС-80	1,50
10-11	Перегрузка	ПКУ-0,8 + МТЗ-80	1,50
11-12	Перевозка	ГАЗ/САЗ 544М	1,05
12-13	Движение по полю	ГАЗ/САЗ 544М	1,05
13-14	Дозирование смеси	Объёмный дозатор	1,35
14-15	Подача к высевающему устройству	Лотковый туконаправитель	1,05
15-16	Распределение смеси центробежным аппаратом	Серийный рабочий орган	5,00
15-16	Распределение смеси штанговым аппаратом	Новый рабочий орган	1,60
15-16	Распределение смеси центробежно-дисковым аппаратом	Новый рабочий орган	1,05
16-17	Распределение по полю штанговым аппаратом	Все штанговые аппараты	1,05
16-17	Распределение по полю центробежным аппаратом	Все типы центробежных аппаратов	1,15

Возможные технологические схемы машин, обеспечивающих одновременное внесение нескольких видов минеральных удобрений, приведены в таблице 2.4.

Длина пути при использовании машин с серийными центробежно-дисковыми аппаратами в перевалочных технологиях максимальна и составляет $L_{max} = 24,65$, а в прямоточных технологиях – $L_{max} = \sum L_{C(n)} = 16,25$.

Таблица 2.4. Варианты технологических схем машин для одновременного внесения трех видов минеральных удобрений

Путь	Технологическая схема машины	Вес: $\Sigma L_{c(n)}$
1	2	3
1 – ... – 17	Серийные машины в перевалочной технологии	24,65
1–2–3–4–10–11–12–13 – 14–15–16–17	Серийные машины (МВУ-5; МВУ-8) при прямой технологии: Кузов – шиберный дозатор – туконаправитель – центробежный рабочий орган.	16,25
1–2–3–4– 10 –12 –13 – 14 – 15– 16– 17	Серийные машины+СЗУ-20 при перевалочной технологии: Кузов – шиберный дозатор – туконаправитель–серийный центробежный рабочий орган.	15,15
1 – 2 – 3 – 4 – 10 – 13 – 14–15–16–17	Новая машина: Кузов (3 отсека) – шиберные дозаторы (3) – смеситель – туконаправитель – серийный центробежный рабочий орган.	12,65
1 – 2 – 14 – 15 – 16 – 17	Новая машина: Кузов (3 отсека) – шиберные дозаторы (3 шт) – туконаправитель (3 шт) – серийный центробежный рабочий орган (3 шт).	8,55
1 – 2 – 14 – 15 – 16 – 17	Новая машина + САР: Кузов (3 отсека) – шиберные дозаторы (3 шт) – туконаправитель (3 шт) – серийный центробежный рабочий орган (3 шт).	4,15
1–2–15–16–17	Новая машина – (Смеситель-разбрасыватель минеральных удобрений): Кузов (3 отсека) – шиберные дозаторы (3)– туконаправитель – серийный центробежный рабочий орган	7,50
1–2–15–16–17	Новая машина +САР – (Смеситель-разбрасыватель минеральных удобрений): Кузов (3 отсека) – шиберные дозаторы (3)– туконаправитель – новый центробежный аппарат	4,00
1–2–15–16–17	Новая машина +САР – (Смеситель-разбрасыватель минеральных удобрений): Кузов (3 отсека) – шиберные дозаторы (3)– туконаправитель – новый штанговый аппарат	2,65

Применение смесителей-загрузчиков снижает влияние расслоения на 6,5%. Длина пути $L_2 = \Sigma L_{c(n)} = 15,15$.

Длину пути, реализуемого машинами, оснащенными смесительными и распределительными рабочими органами $L_3 = \Sigma L_{c(n)} = 12,65$. Это снижает влияние расслоения по отношению к пути L_{max} на 22,2%.

При внесении каждого из компонентов отдельным рабочим органом снижается влияние расслоения смеси по сравнению с $L_{max} = 16,25$ до $L_4 = 8,55$, то есть на 47,4%.

Минимальный путь реализуется при использовании рабочих органов, выполняющих операции смешивания и распределения (путь 1–2–15–16–17). Длина пути $L_{min}=7,50$, что снижает влияние расслоения на 53,8% по сравнению с L_{max} .

При применении центробежно-дисковых аппаратов, адаптированных к видам минерального питания расслоение смеси снижается с $L_{max}=16,25$ до $L_{min}=4,00$. Снижение расслоения составит 4,1 раза.

Использование штанговых рабочих органов позволяет снизить расслоение смеси на пути L_4 с $L_{max}=12,75$ до 4,00, то есть более чем в три раза, а на пути L_{min} с 12,75 до 2,65, что составляет 4,8 раза.

Управление процессами дозирования и распределения позволяет уменьшить длину ребра 2 – 3 с $L_{c(2-3)}=1,35$ до $L_{c(2-3)}=1,05$; ребра 15 – 16 для центробежно-дисковых аппаратов с $L_{c(15-16)}=5,0$ до $L_{c(15-16)}=1,15$, а ребра 16 – 17 с $L_{c(16-17)}=1,15$ до $L_{c(16-17)}=1,05$. Это позволит снизить влияние расслоения на качество распределения компонентов серийными рабочими органами с $L_4=8,55$ до $L_4=4,15$, то есть более чем в 2 раза.

Из таблицы 2.4 следует, что серийные машины не удовлетворяют требованиям адаптивных технологий по критерию расслоения. Для снижения влияния расслоения на качество внесения минеральных удобрений и реализации адаптивных технологий необходима разработка и создание новых машин, распределительных рабочих органов и систем управления процессами: дозирование компонентов; дозирование смеси; распределение компонентов по полю.

2.5. Алгоритмы управления технологическими процессами машин

Общий алгоритм (рис. 2.2) управления процессами внесения минеральных удобрений применительно к машинам с центробежными рабочими органами приведен на рис. 2.9.

Анализ таблиц 2.1 и 2.2 показывает, что управление потоками движения материала в машинах с центробежными рабочими органами можно осуществлять на фазах процессов дозирования, подачи и движения частиц по рабочим поверхностям.

Рассмотрим некоторые особенности алгоритма управления перспективными технологическими процессами машин (рис. 2.9), не отраженные ранее.

**Блок-схема алгоритма функционирования
САР процессом внесения минеральных удобрений**

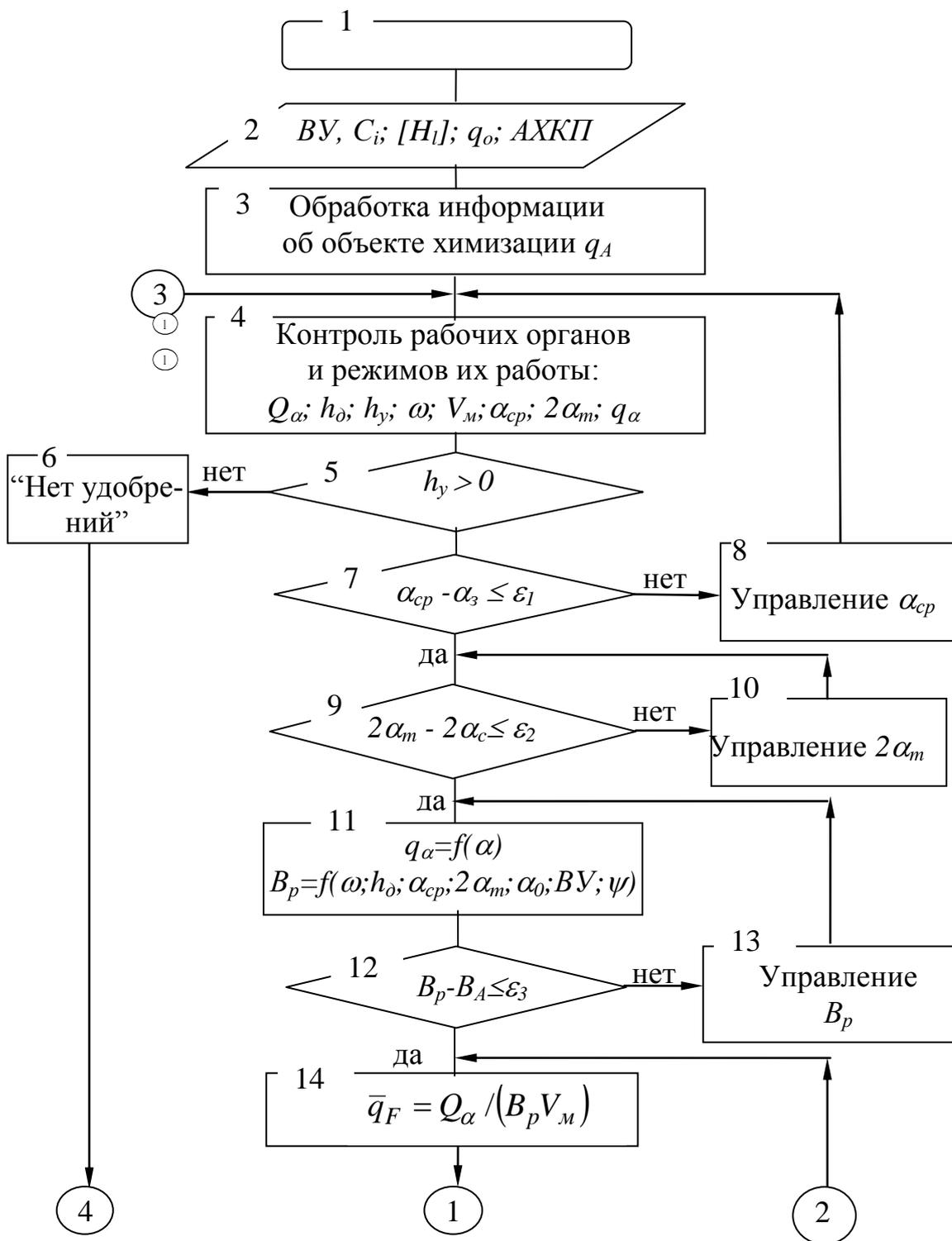


Рис. 2.9, а

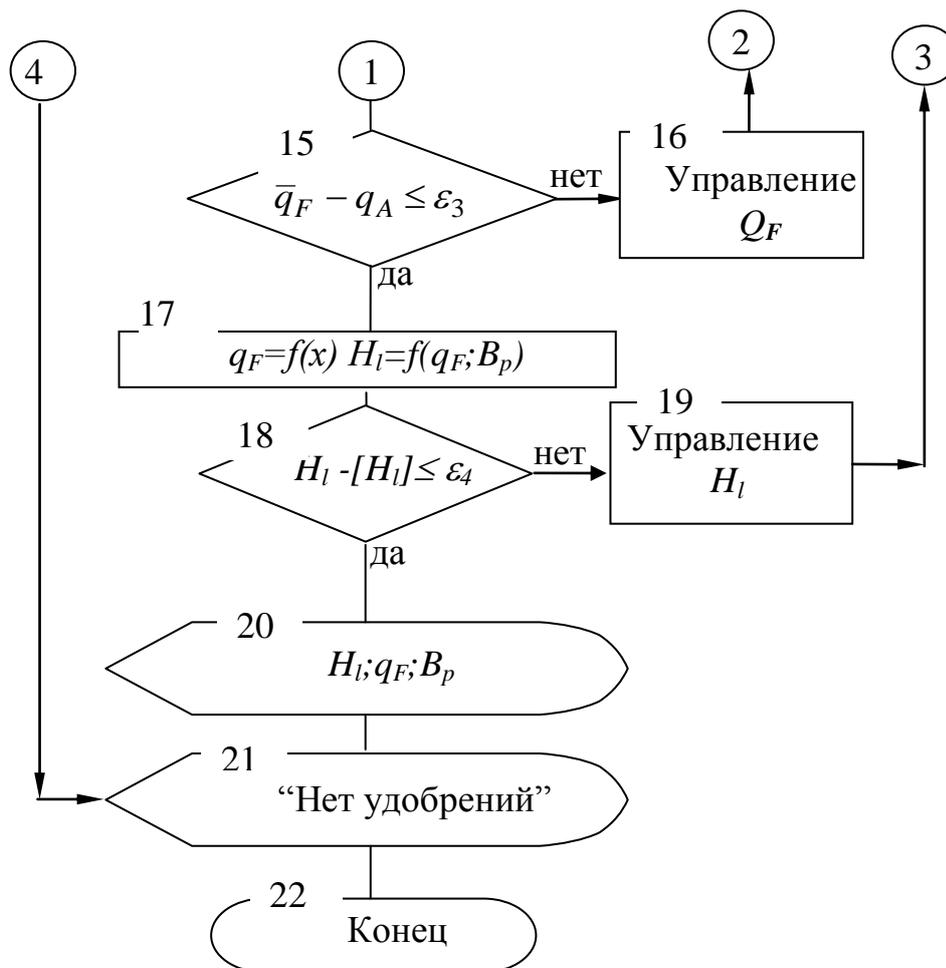


Рис. 2.9, б

Блоки 1, 2, 3 и 4 являются общими для различных типов распределительных рабочих органов и описаны в предыдущих разделах.

Блок 5 сравнения на основании информации, полученной от соответствующих датчиков, вырабатывает команду на продолжение выполнения технологической операции. Если удобрения в кузове или бункере машины отсутствуют, то система передает управление на блок 6. Блок 6 передает об этом информацию в блок 19 в виде сообщения или сигнала и завершает работу.

Блок 7 производит сравнение отклонения сектора рассева от заданного положения. В данном блоке, на основе ранее произведенных операций по вычислению математического ожидания угла α_{cp} , определяется разность $(\alpha_{cp} - \alpha_3)$, которая сравнивается с ошибкой ε_1 .

От выбора ошибки ε_1 управления зависят показатели работы машины, такие как неравномерность распределения частиц компонентов и смеси по поверхности поля и производительность агрегата. Оба эти показателя являются взаимосвязанными. Если с целью увеличения производительности ма-

шины увеличивать разность в углах схода компонентов, то неравномерность распределения может быть разной в зависимости от принятого способа движения агрегата.

При любом способе движения агрегата положение сектора рассева не оказывает значительного влияния на производительность машины, если смещение секторов рассева не превышает $0,1$ рад. Таким образом, ошибка ε_I для машин, оборудованных центробежными рабочими органами, может быть принята равной $\varepsilon_I = 0,1$ рад.

Если разность $(\alpha_{cp} - \alpha_3)$ превышает заданную точность настройки, то управление передается в блок 8. Блок 8, в зависимости от знака ε_I вырабатывает команду исполнительному механизму на соответствующее перемещение положения сектора рассева. После каждого этапа корректировки положения угла α_i управление передается блоку 4.

Это обусловлено необходимостью записи в блок 4 нового значения угла α_i сектора рассева.

При выполнении условия сравнения в блоке 7 управление процессом распределения передается блоку 9. В данном блоке выполняется сравнение угла $2\alpha_m$ сектора рассева с заданным значением $2\alpha_c$.

Для машины с предварительно заданными координатами центра и формы зоны питания центробежного диска обычно угол $2\alpha_m$ сектора рассева не контролируют. В этом случае блоки 9 и 10 могут быть исключены.

При необходимости, контроль угла $2\alpha_m$ сектора рассева можно выполнить несколькими способами. Рассмотрим некоторые из них.

Если имеется функция q_u интенсивности потока частиц, сходящих с лопаток диска, то определив среднее значение угла α_{cp} и среднеквадратическое отклонение σ_α углов метания, угол $2\alpha_m$ сектора рассева определится из выражения:

$$2\alpha_m = 2 \cdot t \cdot \sigma_\alpha$$

где t коэффициент, зависящий от принятого уровня значимости. При 5% уровне значимости $t = 1,96$.

Если функция q_u интенсивности потока частиц, сходящих с лопаток диска не регистрируется для определения угла $2\alpha_m$ сектора рассева в зонах сектора контроля, соответствующих точкам «А», «В» и «С» (рис. 2.3) должны быть размещены датчики интенсивности потока частиц.

В зависимости от вида функции q_u интенсивности потока частиц, принятого уровня значимости и значений импульсов в точках «А», «В» и «С» производится вычисление отношений импульсов $S_{(A)}/S_{(C)}$ или $S_{(B)}/S_{(C)}$.

По этому отношению судят о точности настройки угла $2\alpha_m$. При распределении частиц в секторе рассева близком к нормальному распределению вероятностей и уровне значимости 5% отношение $S_{(A)}/S_{(C)}$ или $S_{(B)}/S_{(C)}$ должно быть равно $0,05 \dots 0,06$.

Если отношение $S_{(A)}/S_{(C)}$ или $S_{(B)}/S_{(C)}$ больше 0,06, то блок 10 формирует команду на увеличение угла сектора рассева, а если оно меньше 0,05 формируется команда на уменьшение угла $2\alpha_m$.

Если функция q_u интенсивности потока частиц значительно отличается от функции плотности нормального распределения, то значение отношения $S_{(A)}/S_{(C)}$ или $S_{(B)}/S_{(C)}$ импульсов находят по опытным данным.

При достигнутом угле $2\alpha_m$ сектора рассева управление процессом передается блоку 11. Блок 11 выполняет операцию вычисления рабочей ширины B_p рассева по одной из методик.

Если ширина B_p рассева ограничена допустимой шириной B_A , в системе управления процессом должны быть предусмотрены блоки 12 и 13 управления шириной рассева. В противном случае управление процессом передается блоку 14 вычисления средней дозы q_F распределения частиц по ширине B_p полосы рассева. Средняя доза q_F сравнивается с заданной дозой q_A внесенной в блоке 15 и, если отклонение доз превышает ошибку ε_3 , то в зависимости от знака в блоке 16 вырабатывается сигнал на управление. Наиболее просто управление дозой осуществлять за счет изменения подачи Q_α .

При выполнении условия $\bar{q}_F - q_A \leq \varepsilon_3$ управление передается блоку 17, в котором по известной функции q_F определяется неравномерность H_l распределения частиц по ширине полосы рассева.

В блоке 18 выполняется проверка условия $H_l - [H_l] \leq \varepsilon_4$. Если условие не выполняется, то блок 19 в зависимости от знака ошибки ε_4 вырабатывает определенную команду на управление равномерностью распределения и передает управления блоку 13 на изменение рабочей ширины рассева. При выполнении условия $H_l - [H_l] \leq \varepsilon_4$ управление передается на блок 21, который формирует информацию о ходе процесса и отображает её на экране.

Рассмотренный алгоритм не может рассматриваться как единственно возможный, так как основные показатели процесса распределения удобрений центробежными рабочими органами являются взаимосвязанными. Это обусловлено тем, что при изменении положения сектора рассева (α_{cp}) изменяются показатели неравномерности H_l и рабочей ширины B_p захвате машины.

При изменении ширины B_p рассева изменяется доза q_F и неравномерность H_l распределения частиц по ширине B_p рассева.

Таким образом, в зависимости от выбранной стратегии управления алгоритм (рис. 5.10) может корректироваться.

Так как при внесении минеральных удобрений обычно стремятся к достижению максимальной производительности агрегата при обеспечении заданной неравномерности H_l распределения, то задача управления технологическим процессом может быть сведена к управлению положением сектора рассева (управление α_{cp}), подачей Q_α и рабочей шириной B_p рассева.

Тогда алгоритм управления процессом распределения минеральных удобрений центробежно-дисковыми рабочими органами может быть упрощен (рис. 2.10).

**Блок-схема упрощенного алгоритма
функционирования САР процессом распределения
минеральных удобрений**

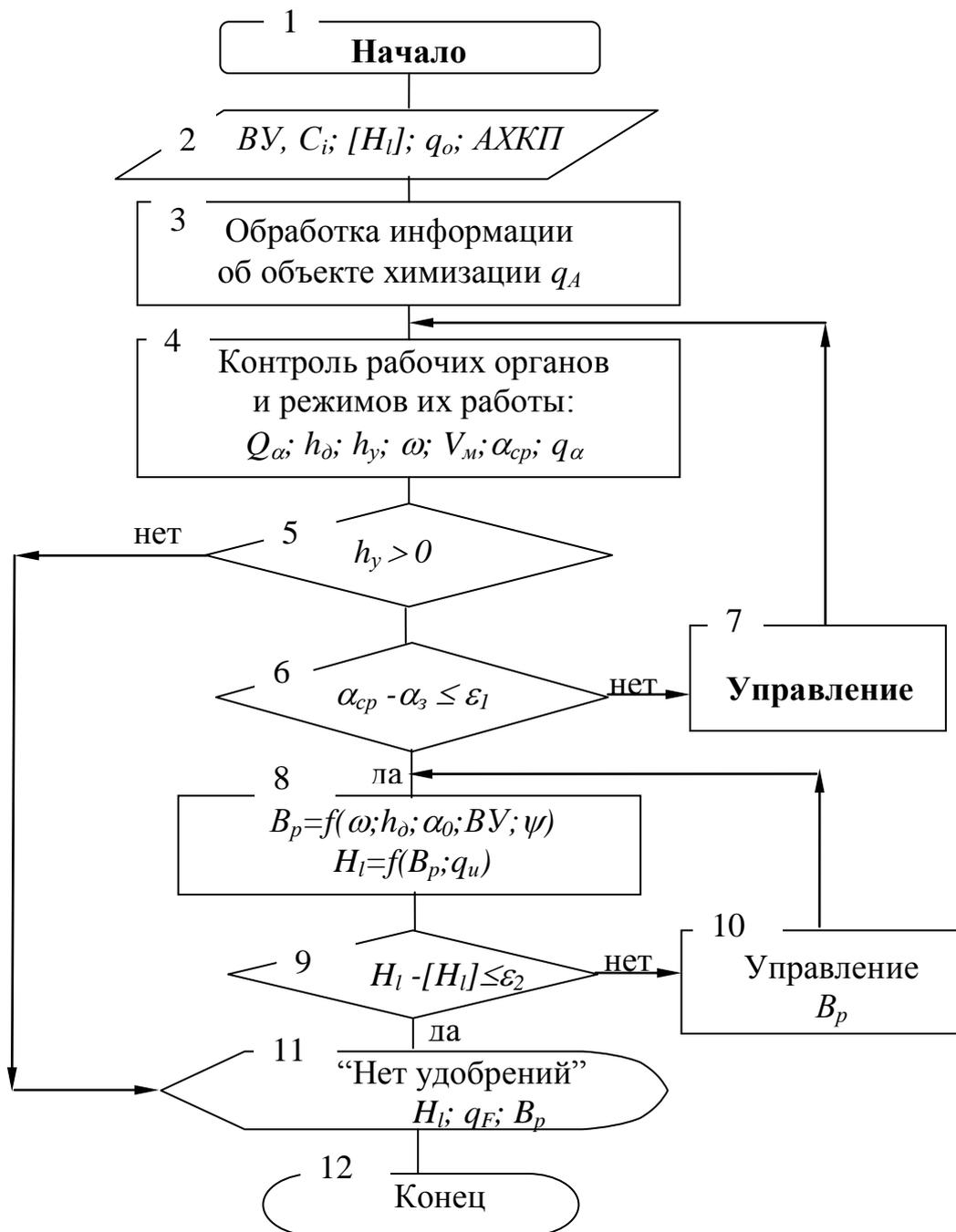


Рис. 2.10

Алгоритмы управления процессом, приведенные на рис. 2.9 и 2.10, могут рассматриваться как общие и перспективные. Они являются достаточно сложными, требуют большого объема вычислительных операций, разработки датчиков, исполнительных механизмов и блоков управления.

Однако современный уровень развития микропроцессорной техники, средств контроля и управления позволяет реализовать все указанные операции управления.

Кроме того, применение микропроцессорной техники позволяет параллельно с управлением технологического процесса распределения минеральных удобрений осуществлять контрольные операции за работой трактора или его механизмов. Использование микроЭВМ не должно ограничиваться управлением какого-либо одного технологического процесса. Уровень разработок в области управления технологическими процессами и возможности ЭВМ позволяют иметь отдельные магнитные носители с программами управления технологическими процессами машин, предусмотренными системой машин для данной зоны.

Опыт разработки и проектирования систем управления [58, 59, 97-98] показывает, что на начальном этапе автоматизации подлежат некоторые, наиболее важные операции технологического процесса. Постепенное усложнение систем управления, отработка элементной базы и методов управления локальными системами создают возможности для разработки общих систем управления технологическими процессами.

Технологический процесс внесения минеральных удобрений шнековыми рабочими органами зависит от конструктивной схемы машины и способа подачи материала к транспортирующему органу. В распределительных системах, работающих по тупиковой схеме, весь материал, поступивший в кожух шнека, должен быть распределен равномерно между высевными отверстиями. В машинах, оборудованных шнековыми и спирально-шнековыми распределительными системами, процесс дозирования материала осуществляется по двум схемам. По одной из них подача материала в кожух шнека осуществляется из кузова или бункера, по другой - забор материала из кузова или бункера осуществляется шнеком.

Процесс транспортирования и дозирования материала в дальнейшем протекает по близким закономерностям. Анализ работы шнековых и спирально-шнековых показывает, что процессы транспортирования и дозирования материала этими рабочими органами аналогичны, хотя полного совпадения нет.

Учитывая эти особенности, рассмотрим алгоритм управления технологическим процессом внесения минеральных удобрений шнековыми и спирально-шнековыми рабочими органами.

Данный алгоритм разработан на основе общего алгоритма (рис. 2.2) САУ процессов внесения удобрений и анализа случайных, технологических и управляющих воздействий, приведенных в таблице 2.2.

Исходная информация, отраженная в блоках 2 и 3 (рис. 2.11), является общей как для центробежных, так и для штанговых рабочих органов.

Блок 4 контроля рабочих органов и режимов их работы обрабатывает информацию, поступающую от датчиков контроля угловой скорости ω шнека или вала привода спирали, скорости V_m движения машины, производительности q_i высевных отверстий и подачи Q_α материала.

В качестве датчиков угловой скорости ω и скорости V_m могут быть использованы тахогенераторные или импульсные датчики.

Для регистрации производительности q_i высевных отверстий можно использовать датчик интенсивности потока частиц, оптические или тензорезисторные преобразователи. В разработанных нами конструкциях шнековых и спирально-шнековых распределительно-высевающих систем контроль производительности q_i высевных отверстий можно выполнять по двум значениям q_1 и q_n в заборной и периферийной частях кожуха. Это обусловлено тем, что высевные отверстия расположены таким образом, что объем материала расположенного над нижней кромкой отверстий по всей длине шнека одинаковый.

В этом случае подача Q_α оценивается с некоторой ошибкой, обусловленной неравномерным дозированием и, при центральном расположении кузова или бункера, равна

$$Q_\alpha = \sum_{i=1}^n (q_1 + q_n),$$

где n – число высевных отверстий, расположенных по одну сторону от бункера или кузова.

Если дозирующая система обеспечивает высев удобрений по всей длине кожуха, то подача определится по формуле

$$Q_\alpha = \frac{\sum_{k=1}^2 (q_n + q_k)}{2l_\delta} B_p,$$

где q_n, q_k – доза удобрений попавшая на датчик, установленный соответственно в начале и конце штанги; k – число штанг; l_δ – длина датчика.

Блок 5 производит вычисление действительной дозы на основе информации, поступившей от датчиков и исходной информации о рабочей ширине B_p посева.

Блок-схема алгоритма функционирования системы управления процессом внесения удобрений штанговыми аппаратами

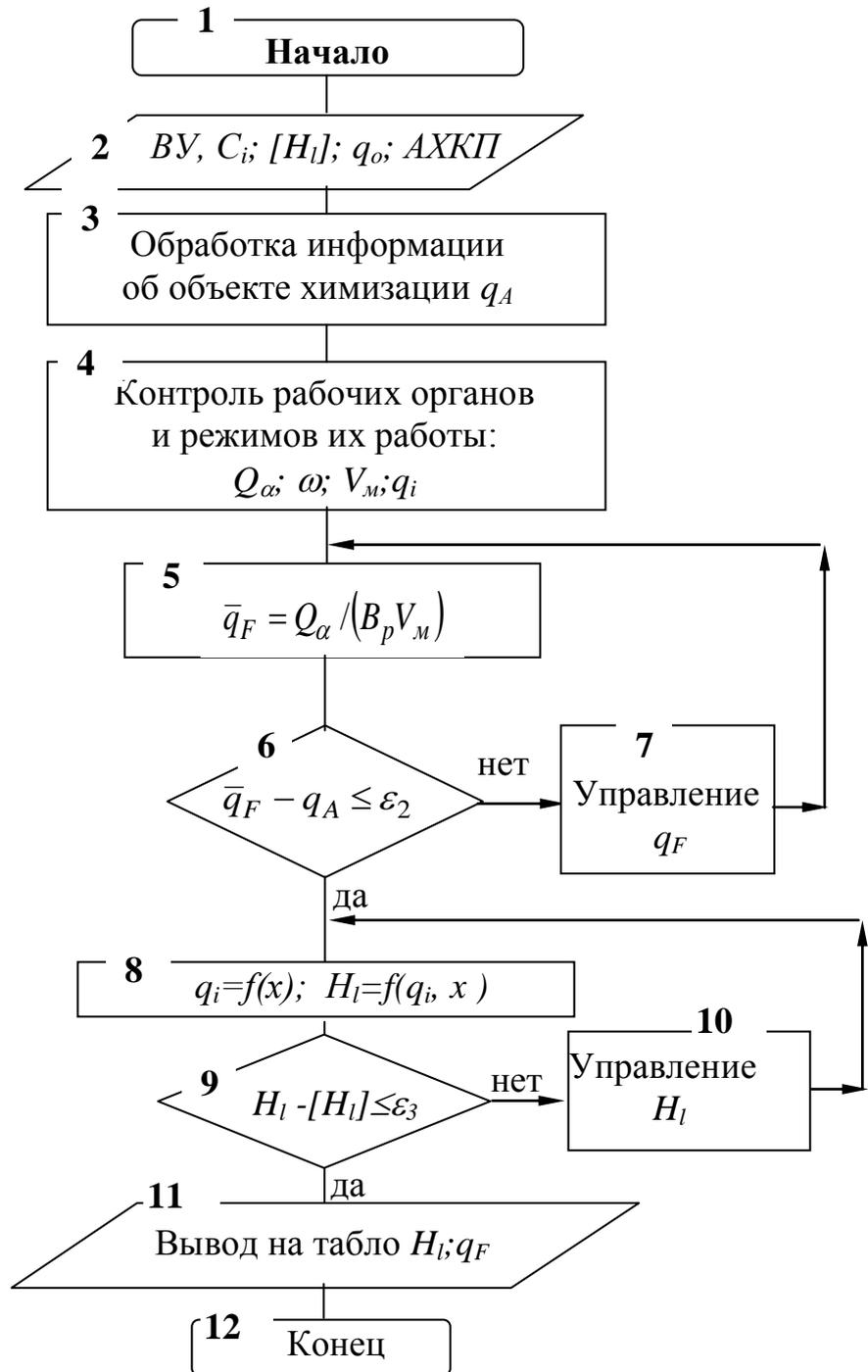


Рис. 2.11

В блоке 6 производится сравнение действительной дозы q_F с заданной q_A по агротехническим условиям дозой и вырабатывается сигнал на передачу управления. Если разность доз превышает ошибку ε_2 , то управление передается блоку 7, который в зависимости от знака ε_2 вырабатывает команду на изменение подачи Q_a . В зависимости от способа подачи материала в кожух шнека управление осуществляется по двум схемам. При подаче удобрений в кожух шнека из бункера или кузова управление Q_a выполняется аналогично управлению подачей у машин с центробежными рабочими органами.

Если аппарат конструктивно выполнен так, что шнек или спираль производят забор материала из бункера, то управление подачей осуществляется путем изменения угловой скорости шнека. Для плавного регулирования подачи Q_a машину целесообразно оснастить устройствами бесступенчатого изменения угловой скорости. Такими устройствами могут являться вариаторы (цепные или ременные) или управляемый электропривод. Необходимо отметить, что управление подачей путем изменения угловой скорости шнека не является единственным. Управление подачей может быть реализовано за счет установки над спиралью или шнеком козырьков, управляющих объемом материала, забираемого шнеком из бункера.

Если разница в дозах q_F и q_A не превышает заданной ошибки ε_2 , управление передается блоку 8. Блок 8 обрабатывает информацию от датчиков интенсивности потока частиц и формирует функцию $q=f(x)$ распределения удобрений по ширине штанги. Функция $q=f(x)$ распределения удобрений обрабатывается и вычисляется неравномерность H_l распределения материала по ширине полосы рассева. Для обработки функции $q=f(x)$ она должна быть представлена в виде дискретного ряда. Если дозирование удобрений производится через окна, то ряд формируется из доз q_i . При дозировании удобрений через высевающую щель формирование ряда удобнее всего осуществлять путем регистрации значений доз q_i через равные промежутки. Это можно осуществить, применяя датчик, перемещаемый вдоль штанги на равные промежутки за один цикл.

Если датчик интенсивности потока частиц протарирован, то информация, поступающая от него, может быть использована для контроля подачи Q_a . При высеве удобрений через дозирующие отверстия подача равна

$$Q_a = \sum_{лев} q_i + \sum_{прав} q_i.$$

При рассеве материала через высевающую щель подача определится по формуле $Q_a = (\sum_{лев} q_i + \sum_{прав} q_i) \frac{l_u}{B_p}$, где l_u – расстояние между точками измерений дозы q_i .

Неравномерность дозирования определяется коэффициентом вариации $V_s = 100(\sigma_F / \bar{q}_F)$, где σ_F – среднее квадратическое отклонение доз, равное

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{\sum(q_i - \bar{q}_F)^2}{n-1}}, \quad \bar{q}_F - \text{среднее значение доз удобрений, попавших в улавливатель; } n - \text{число оцениваемых доз (проб)}.$$

Если условие сравнения в блоке 9 не выполняется, то управление передается блоку 10, который в зависимости от знака ε_3 вырабатывает сигнал на управление равномерностью дозирования. Система управления равномерностью дозирования нами будет рассмотрена ниже.

При выполнении условия сравнения в блоке 9 управление передается блоку 11 информационной системе. При наличии информационного табло на нем отражаются показатели работы машины H_i и q_F . При необходимости на информационном табло может быть отражена информация о норме Q_F высева, обработанной площади A_F , скорости машины V_m .

В зависимости от степени автоматизации технологического процесса внесения минеральных удобрений штанговыми сеялками САУ может содержать все функции, отраженные в данном алгоритме или выполнять некоторые из них. Учитывая, что качественные показатели процесса внесения удобрений являются наиболее важными, то при разработке САУ процессом внесения удобрений машины, в первую очередь, следует оснащать системами контроля и управления равномерностью распределения материала по полю.

Анализ работ по исследованию процесса дозирования минеральных удобрений и их смесей позволяет заключить, что обеспечение равномерного дозирования материала является сложной научной задачей. Данный процесс подвержен влиянию многих случайных воздействий, приводящих к нарушению равномерности дозирования и расслоению многокомпонентных смесей.

Из известных способов дозирования в машинах для внесения минеральных удобрений наибольшее распространение получил объёмный способ дозирования. В машинах кузовного типа материал подается транспортирующим органом и выдаётся через дозирующее окно, перекрываемое заслонкой. Объём материала, поступающего на подающий рабочий орган, зависит от физико-механических свойств минеральных удобрений, состава туковой смеси и ряда других случайных воздействий. В зависимости от конструкции механизма привода транспортера объёмная подача может являться функцией скорости движения машины (привод транспортера от ходовых колес машины или зависимого вала отбора мощности) или функцией скорости движения транспортера (независимый привод транспортера).

Без учета влияния случайных воздействий производительность транспортерных питателей является сложной функцией вида:

$$Q = f(u_m; b; h; \rho'),$$

Так как при зависимом приводе скорость движения транспортера связана со скоростью V_m движения машины то управляющим воздействием $X(t)$ является высота открытия дозирующей заслонки, а возмущающими воздей-

ствиями $Z(t)$ – плотность ρ' материала, скорость V_m движения машины и ряд других случайных воздействий $X_e(t)$ (таблица 2.1).

Учитывая, что плотность удобрений в процессе движения машины и воздействий внешней среды изменяется, а передаточное отношение $i \neq const$ из-за буксования или проскальзывания, производительность питателя будет переменной. Это приводит к варьированию подачи $Y(t)$ материала на бросковый аппарат, что нежелательно. Кроме того, при разработке перспективных систем внесения удобрений необходимо иметь устройства для управления подачей материала на бросковый аппарат в зависимости от обеспеченности почв питательными элементами, то есть устройство ввода информации о требуемой подаче Y_0 .

Источником информации о требуемой подаче Y_0 могут служить данные обработки агрохимической карты поля или сигнал, выработанный микроЭВМ, системы контроля обеспеченности почв питательными элементами. В случае ручного управления подачей значение q_A вводится оператором.

Для решения этих задач машина должна быть оборудована системой контроля и управления подачей материала. Система управления подачей материала (объектом управления - ОУ) должна содержать исполнительный механизм привода дозирующей заслонки, датчики уровня удобрений в бункере

машины и датчик подачи материала, связанные с управляющим устройством. Структурная схема системы управления подачей приведена на рис. 2.12 и содержит блок 1 управления, к которому подключены датчики 2 уровня удобрений в кузове и датчик 3 подачи материала. Сигналы от датчиков 2 поступают в блок 4 обработки информации, а сигнал от датчика 3 поступает в аналогово-цифровой преобразователь 5, соединенный с

Структурная схема системы контроля и управления подачей

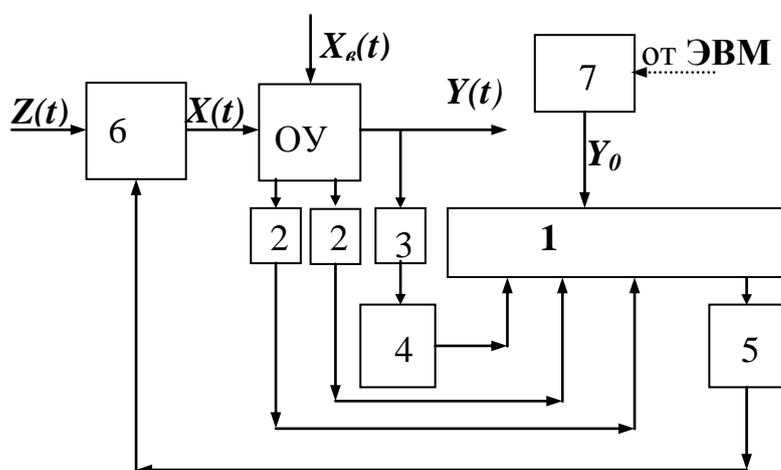


Рис. 2.12

блоком 1 управления соответствующими каналами связи. Блок 1 управления обрабатывает поступившую информацию и вырабатывает управляющие сигналы, которые через схему 5 управления поступают на исполнительный механизм 6. Информация о требуемой подаче поступает в блок 1 управления от датчика 7, являющегося внешним устройством, в виде микроЭВМ нижнего уровня, или вводится оператором.

При применении систем контроля обеспеченности почв питательными элементами информация обычно поступает в виде требуемой дозы q_0 . Тогда подача материала на диск вычисляется в блоке 1 по формуле:

$$Y_0 = Q = q_0 \cdot B_p \cdot V_m \cdot$$

Расчетная доза q_0 зависит от вида вносимых удобрений или туковой смеси и от требуемых доз q_i питательных элементов. Если концентрация K_i питательных элементов известна, то расчетное значение дозы определится по формуле: $q_0 = \sum \frac{q_i}{K_i}$.

Алгоритм функционирования системы контроля рабочих органов и управления подачей материала приведен на рисунке 2.13. Если данная система является составной (локальной) частью системы управления процессом внесения удобрений, то в блок 2 ввода информации массив исходных данных формируется центральным процессором. При автономном использовании данной системы исходные данные должны быть введены в память микроЭВМ.

В зависимости от типа механизма привода транспортера информация об угловой скорости ω_m может поступать от датчика или вычисляться в микроЭВМ при известной скорости V_m и передаточном отношении приводного механизма. Вид вносимых удобрений (ВУ) и требуемая доза q_F вводятся в память микроЭВМ оператором.

Блок 3 сравнения определяет угловую скорость ω_m вала транспортера и, если $\omega_m = 0$ (вал не вращается), возвращает систему в исходное состояние. При нормальном режиме функционирования механизма привода транспортера информация об угловой скорости поступает в блок 5.

Блок 4 сравнивает показания датчиков уровня удобрений в кузове и при $h_y = 0$ возвращает систему в исходное состояние. Если $h_y > 0$ то выполняется контроля и управления.

Блок 5 обработки информации производит вычислительные операции с целью определения расчетной подачи Q_0 удобрения или туковой смеси дозатором.

Определение расчетной подачи Q_0 можно выполнить по известным формулам в том случае, если рабочая ширина B_p известна из конструкции машины, например, при работе с ветрозащитным или распределительным устройством. В противном случае ширина B_p является функцией дальностей ρ_{cp} полета частиц компонентов смеси и их среднеквадратических отклонений σ_p . Задача определения ширины B_p может быть решена несколькими способами.

Блок-схема системы дозирования минеральных удобрений

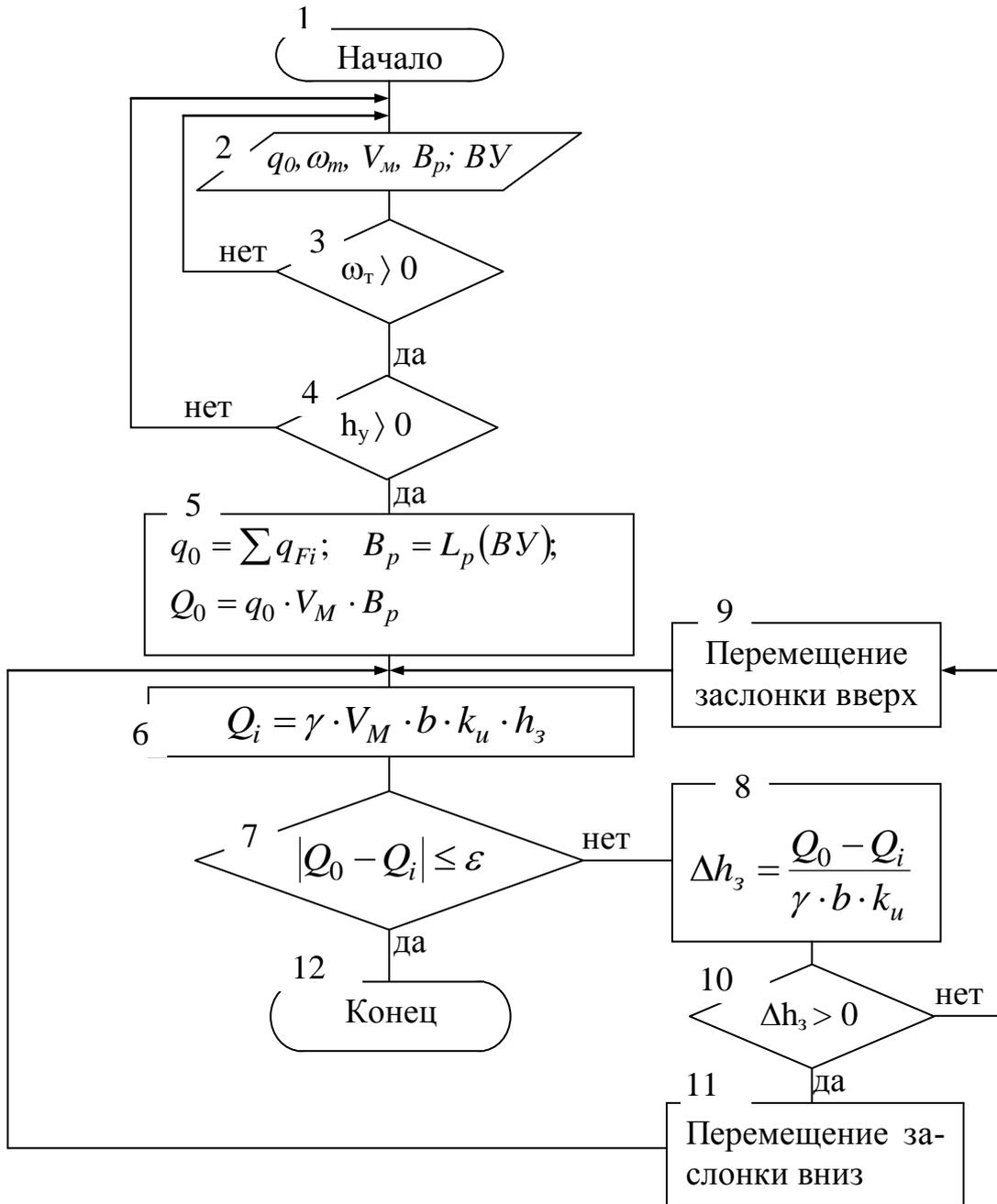


Рис. 2.13

Аналитический способ определения ширины B_p может быть реализован на основании зависимостей (1.21), предложенных В.А. Черноволым и следующего алгоритма.

1. При заданной высоте расположения диска и его форме определяется угол α_0 наклона вектора абсолютной скорости V_0 схода частиц с лопаток диска.
2. Задаются параметры зоны питания диска: радиусы начала r_{min} и конца r_{max} и соответствующие им центральные углы λ_{min} и λ_{max} .
3. По значениям r и λ определяется угол $2\alpha_m$ сектора метания.
4. С помощью датчика интенсивности потока частиц выявляется функция p_α плотности распределения частиц в секторе метания.
5. Учитывая, что распределение удобрений вдоль линии метания близко к нормальному распределению вероятностей, по значениям V_0 и α_0 определяются или задаются статистические характеристики зоны распределения (математическое ожидание ρ_{cp} и среднеквадратическое отклонение дальности метания).
6. На основании зависимости (1.21) определяется закон распределения дозы q_F по ширине полосы рассева.
7. По допускаемому показателю $[H_i]$ неравномерности определяется рабочая ширина рассева.

В блок 6 от соответствующего датчика поступает информация о текущем положении дозирующей заслонки h_3 и вычисляется подача Q_i .

Блок 7 определяет разность расчетной и текущей подач и сравнивает её с принятой ошибкой ε дозирования. Если условие $|Q_0 - Q_i| \leq \varepsilon$ не выполняется, то в блоке 8 вычисляется требуемое перемещение Δh_3 заслонки, которое сравнивается в блоке 9 и вырабатывается сигнал на её перемещение вверх или вниз. Если $\Delta h_3 > 0$ блок 10 вырабатывает команду на перемещение заслонки вниз, то есть на уменьшение подачи, а если $\Delta h_3 < 0$ команда на увеличение подачи вырабатывается в блоке 11 и передаётся на исполнительный механизм. После корректировки положения дозирующей заслонки сигнал о текущем положении заслонки h_3 поступает в блок 6, а затем в блок 7 сравнения. Если условие $|Q_0 - Q_i| \leq \varepsilon$ выполняется, тогда процесс управления завершается и система переходит в режим ожидания.

В машинах бункерного типа дозирование материала осуществляется через дозирочную щель или окно. Материал, как правило, поступает на лопатки распределительного рабочего органа.

2.6. Анализ технологического процесса внесения минеральных удобрений

Для разработки структурных схем систем управление необходимо иметь математическое описание изучаемого объекта автоматизации. Рассмотрим случай внесения смесей минеральных удобрений машинами с центробежно-дисковыми аппаратами, как наиболее общий.

При математическом описании технологического процесса внесения минеральных удобрений центробежным аппаратом будем исходить из того, что по ширине полосы рассева должно быть обеспечено равномерное распределение заданной дозы q_F удобрений.

Дозу удобрений, выпавших на площадку, удаленную от оси прохода на расстояние x можно определить по формуле (1.21). Входящие в (1.21) величины имеют следующие обозначения:

Q_α - подача материала, равная $Q_\alpha = 10^{-4} q_F \cdot B_p \cdot V_m$;

$p(\alpha)$ и $p(\rho)$ - функции плотности распределения частиц в секторе рассева и вдоль линии метания;

α_m – половина угла сектора метания;

ρ_1, ρ_2 – соответственно наибольшая, наименьшая дальность полета частиц;

α_1, α_2 – углы метания, соответствующие радиусам ρ_1, ρ_2 .

При метании частиц минеральных удобрений с близкими скоростями распределение частиц вдоль линии метания близко к нормальному распределению вероятностей.

При сосредоточенной подаче распределение минеральных удобрений на выходе центробежного аппарата близко к нормальному распределению вероятностей.

При распределенной подаче материала на диск функция $p(\alpha)$ плотности может иметь другой вид. В этом случае она должна быть задана или определена экспериментально.

Равномерность распределения удобрений по поверхности поля оценивается коэффициентом вариации

$$H_l = 100 \frac{\sum |q_i - \bar{q}_F|}{n \cdot \bar{q}_F}, \quad (2.10)$$

где \bar{q}_F - среднее значение доз удобрений, попавших в улавливатель;

q_i – текущее значение доз;

n – число оцениваемых доз (проб).

Из предположения о нормальном распределении удобрений в секторе рассева и вдоль линии метания следует, что функции $p(\alpha), p(\rho)$, входящие в (1.21) будут описаны, если известны их математические ожидания α_{cp}, ρ_{cp} и среднеквадратические отклонения $\sigma_\alpha, \sigma_\rho$.

Математическое ожидание угла α_{cp} сектора рассева определяется выражением

$$\alpha_{cp} = \lambda + \theta + \omega t - \pi. \quad (2.11)$$

Угол ωt поворота диска за время относительного движения частицы по лопаткам, установленным под углом ψ_0 к радиусу центробежного диска определится по формуле (1.11).

Особенность технологического процесса машин, оборудованных центробежными и другими метательными рабочими органами, является то, что неравномерность распределения удобрений по ширине полосы рассева не удовлетворяет требованиям агротехники. Доза q_i выпавших удобрений на краях полосы рассева убывает.

Поэтому для достижения требуемых показателей качества последующие проходы машины выполняются с перекрытием смежных проходов. Перекрытие ΔB смежных проходов зависит от кинематических и конструктивных параметров рабочего органа, физико-механических и аэродинамических свойств удобрений, а так же от принятого способа движения агрегата.

Вследствие работы машины с перекрытиями происходит наложение доз q_i друг на друга (рис. 2.15).

Следовательно, у машин с метательными рабочими органами рабочая ширина B_p рассева является сложной функцией зависящей не только от отмеченного выше, но также от перекрытия ΔB и точности вождения агрегата.

Если распределение доз удобрений симметрично относительно оси движения агрегата (рис. 2.15, а), то рабочая ширина B_p рассева наибольшая.

К выбору перекрытия при смежных проходах агрегата с центробежными рабочими органами

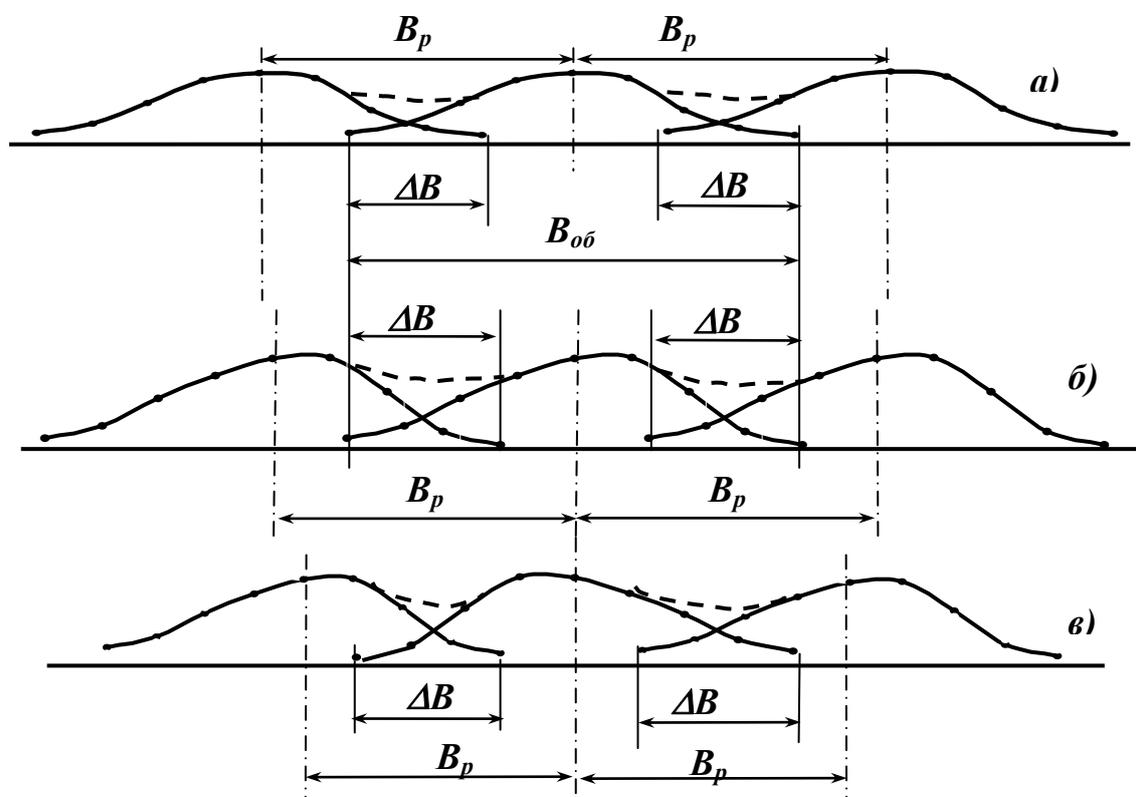


Рис 2.15

При несимметричном распределении (рис. 2.15,б; в) доз ширина B_p уменьшается, а требуемое перекрытие ΔB увеличивается. Причем перекрытие ΔB при круговом способе движения (рис. 2.15, б) меньше, чем при челночном (рис. 2.15, в).

Технологический процесс внесения минеральных удобрений центробежными рабочими органами представим как ряд последовательно протекающих процессов (рис. 2.16):

- дозирования материала (Π);
- движение (Δ) машины по полю
- подачи материала (H) на рабочий орган;
- рассев материала центробежным аппаратом (Δ);
- распределение (P) материала по поверхности поля;

Задающими воздействиями процесса внесения минеральных удобрений являются подача минеральных удобрений (Q_c), обладающих определенными физико-механическими ($\gamma=f(t)$, $\varphi=f(t)$ и др), аэродинамическими ($K_n=f(t)$) и другими характеристиками; требуемая доза $\bar{q}_F(i)$ внесения каждого из компонентов; рабочая ширина B_p рассева.

**Модель технологического процесса внесения удобрений
центробежно-дисковым аппаратом**

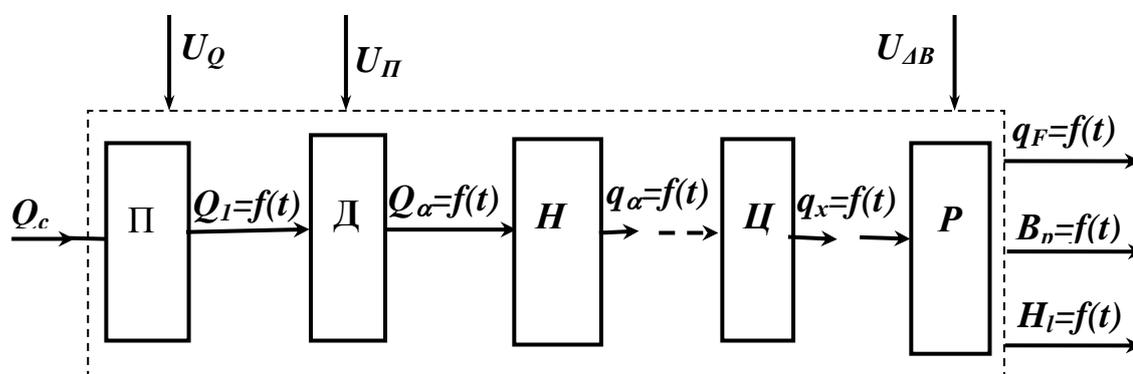


Рис. 2.16

При создании систем автоматического управления процессом внесения минеральных удобрений машинами с центробежными рабочими органами трудность вызывает выбор управляемых параметров. В настоящее время осуществить управление процессом внесения удобрений по качественному показателю не представляется возможным, так как отсутствуют методы и технические средства для непосредственной оценки дозы q_F внесенных удобрений по поверхности поля. Очевидно, первым этапом разработки автомати-

ческих систем управления процессом будет создание систем управления по количественным показателям.

Основным количественным показателем качества распределения материала по поверхности поля является положение сектора рассева, определяемое средним углом α_{cp} метания частиц. Задачей управления процессом внесения минеральных удобрений является стабилизация угла α_{cp} метания при обеспечении необходимой ширины B_p рассева и равномерности распределения частиц по полю.

2.7. Определение варибельности почвенного плодородия

Оценка почвенного плодородия строится на основе оперативной диагностики (почвенной и растительной) минерального питания. Интенсификация земледелия значительно расширяет возможности управления почвенным плодородием и продуктивностью возделываемых культур за счет регулирования их минерального питания, что принципиально повышает требования к точности и надежности оперативной диагностики содержания питательных элементов в почве и обеспеченности элементами.

При проведении растительной диагностики определяется химический состав растений по которому рассчитывается содержание соответствующих элементов питания в корнеобитающем слое почвы. Однако интерпретация результатов анализов растений при таком способе резко усложняется. Это связано с тем, что по мере роста биопродуктивности агроценозов возрастает значимость сбалансированности всех необходимых элементов питания и взаимообусловленности их уровней, сужается интервал оптимальных значений. Одно и то же процентное содержание какого-либо элемента может приобретать разное физиологическое содержание в зависимости от обеспеченности остальными элементами.

В почвенном институте имени В. В. Докучаева была создана интегрированная система оперативной диагностики, основанная на принципах и методах получения и обработки информации с применением ЭВМ. По данной системе можно количественно выразить степень избыточности или дефицитности более 10 элементов питания с учетом взаимообусловленности их уровней.

Недостатком данной системы является отсутствие достоверной информационной базы по почвенному плодородию и ее стационарность.

Известна методика по определению дозы азотной подкормки, основанная на цветовой реакции взаимодействия нитратов с дифениламином. Этот экспресс-метод относительно прост, однако для его осуществления в хозяйстве требуется работа группы специалистов. При этом агроном получает усредненные данные по полю для разового применения азота, не имея возможности ориентироваться в его динамике.

Компания "ГидроАгри" усовершенствовала данную методику путем использования N-сенсоров, установленных на кабине трактора. Сущность способа определения содержания азота в растениях заключается в следующем. В фазе кущения зерновых культур с помощью N-тестера вручную производятся измерения на растущей культуре уровня азотного питания в течение вегетации. Полученная N-тестером информация позволяет корректировать работу N-сенсора. Датчики N-сенсора устанавливаются на кабине трактора по углам, обеспечивая необходимый обзор культуры с четырех сторон. Данные отражения света от листовой поверхности передаются в компьютер, который управляет дозирующей системой разбрасывателя минеральных удобрений во время его работы. Разность оттенков цветовой гаммы позволяет судить о потребности растений на конкретном участке поля в азотной подкормке. Основными недостатками данной технологии являются: зависимость от погодных условий (изменение освещения, дождь и т.д.), ограниченность работы во времени суток (в вечерние и ночные часы система не работает), применение только азотных удобрений в подкормку. Традиционно состояние плодородия почв определяется путем замеров в пахотном слое почвы содержания N, P₂O₅, K₂O₃, рН и др. по действующим методикам. Для этой цели при зональных научно-исследовательских институтах агрономического направления и ряде районных управлений сельского хозяйства созданы агрохимические лаборатории. Сущность метода определения содержания основных питательных элементов в почве заключается в следующем. В специально отбираемых образцах из пахотного слоя делают определения рН, почвенного азота, подвижных фосфора и калия. По этим данным составляют агрохимические картограммы хозяйств.

Исследования показали, что для различных типов почв (подзолистые, черноземы, каштановые и т.д.) нельзя пользоваться каким-то единым методом определения почвенного азота, фосфора и создать единую шкалу для разделения почв по его содержанию. В зависимости от особенностей почв должны быть дифференцированы и методы определения подвижного калия. В то же время, применяя методы, разработанные для определения плодородия (например, метод Кирсанова для определения подвижного фосфора в дерново-подзолистых почвах, метод Мачигина для карбонатных почв), можно получить данные, которые в известной мере коррелируют с результатами полевых и вегетационных опытов. Поэтому для каждой почвенной зоны устанавливают свой набор методов определения в почвах подвижных форм питательных элементов.

В зональных агрохимических лабораториях черноземной зоны при определении подвижного фосфора в некарбонатных черноземах принят метод извлечения подвижного фосфора по Чирикову (0,5-нормальная уксусная вытяжка). В этой же вытяжке определяют на пламенном фотометре и подвижный калий.

Стандартным методом для определения подвижного фосфора в карбонатных черноземах, бурых почвах и сероземах является метод Мачигина. Подвижный калий в этих почвах определяют также в 1%-ной углеаммонийной вытяжке, то есть подвижный фосфор и калий в карбонатных почвах определяют в одной вытяжке.

Для каждого из этих методов разработаны свои группировки почв по содержанию в них подвижных фосфора и калия. По этим градациям выделяются на картограммах фосфора и калия контуры почв, различающихся по содержанию подвижных форм элементов.

Эти шкалы разработаны с учетом данных полевых опытов, показавших, что между содержанием питательных веществ в почвах и эффективностью удобрений имеется коррелятивная связь. Однако эта связь еще недостаточно полностью установлена и её продолжают уточнять, чем объясняются значительно различающиеся градации для одного метода в различных руководствах.

На основе анализов смешанных образцов почв, проведенных по рекомендуемым для данной зоны методам, составляют картограммы кислотности почв (для подзолистой и лесостепной зон), содержания фосфора и калия.

Техника составления картограмм следующая: на план землепользователя с сеткой пронумерованных элементарных прямоугольных участков в середину каждой клетки выписывают результаты анализов. Затем клетки с данными, относящимися к одной группе по кислотности или содержанию азота, фосфора и калия, закрашивают соответствующим цветом. После этого участки одного цвета объединяют в общие контуры и ставят индексы согласно экспликации.

К недостаткам применяемой методики следует отнести высокую трудоемкость выполняемых работ, в первую очередь по отбору проб и утерю значительной части информации, необходимой для принятия оптимальных решений.

Важным элементом дифференцированного применения удобрений является установление связи между параметрами пестроты плодородия и урожайностью сельскохозяйственных культур. Это позволит рассчитывать оптимальные дозы удобрений для получения запрограммированной урожайности выращиваемых культур на конкретном поле. За рубежом для этой цели используют системы GPS. Однако, недостаточная информационная база по рынку сельскохозяйственной продукции и высокая стоимость услуг сдерживают использование данной системы.

Основной составляющей технологии координатного земледелия является система позиционирования, а основным элементом её является приемник сигналов GPS. Применение GPS за рубежом позволяет фермерам автоматизировано определять координаты при отборе проб, составлять карты урожайности, вносить удобрения на отдельные участки поля, определять границы поля, местоположение сорняков и вредителей растений. Однако, следует

отметить, что точность приемников сигналов GPS зависит от большого количества факторов, основными из которых являются качество изготовления приёмников, правильность их установки, учет погрешностей из-за несовершенства спутниковых систем, состояние атмосферы, точность подаваемого сигнала. Точность определения координат в системе GPS напрямую зависит от стоимости приемника, цена которого изменяется от 100 до 100000 долларов. В настоящее время ведутся исследования по использованию приемников GPS для вождения агрегатов по заданному курсу при внесении удобрений и средств защиты растений. Установлено, что с помощью этих систем можно обеспечить более надежную стыковку смежных проходов, выполнять операции в ночное время и т.д. Широкомасштабные исследования ведутся по совершенствованию приборов для измерения урожайности, а также методов обработки полученной информации с целью повышения точности измерений. В 1997 году во время уборки зерновых в США и Канаде использовалось 17000 мониторов урожайности, т.е. ими было укомплектовано около 3% всех комбайнов. По данным департамента сельского хозяйства США в 1998 около 18% площадей под кукурузой и соей убирали с использованием мониторов урожайности. Однако, около половины мониторов использовалось без подключения к системе глобального позиционирования, что не позволило составить карты урожайности сельскохозяйственных культур и эффективно использовать полученные данные для принятия решений. Мониторы урожайности применяют и в других странах. В Англии (350 мониторов урожайности), в Германии (около 500 мониторов), в Австралии (200 мониторов), в Аргентине, в Бразилии, в Мексике.

В России данные системы для определения урожайности не применяются. Следует отметить, что мониторы для определения урожайности сельскохозяйственных культур в момент уборки имеют недостаточно высокую точность. Используемые в них весовые датчики весьма чувствительны к вибрациям, запыленности, засоренности и влажности зерновой массы. На выставке "Agrotek-2003" было показано расширение сферы использования GPS в технологиях точного земледелия. Датские исследователи представили управляемый посредством GPS полевой робот, который с помощью цифровых цветных фотографий способен регистрировать разновидности и количество сорняков на участках поля, затем эта информация, обработанная на компьютере, используется для приготовления аэрозолей и точного управления распылением агрохимикатов по поверхности. Такая система позволяет достичь две важные цели – уменьшение воздействия химикатов на окружающую среду и экономия гербицидов.

В Швейцарии разработана новая информационная система AG RO-COM, предназначенная для получения, обработки и использования информации о состоянии почвы и урожая. Основой новой технологии является карта возделываемого поля, на которую посредством космической аэросъемки наносятся данные о содержании питательных веществ в почве и состоянии

выращиваемых культур на отдельных участках поля. Эти данные обрабатываются на компьютере и по результатам их анализа вырабатываются рекомендации по внесению удобрений, защите растений и т.д. с учетом координат и различия отдельных участков поля.

Основным недостатком перечисленных выше технологий является то, что невозможно с помощью спутниковых и других навигационных систем определить содержание питательных элементов в почве (вариабельность плодородия) на глубине пахотного слоя. Видимо поэтому не одна зарубежная и отечественная фирмы не представили конкретную информацию по рассматриваемому вопросу. Поэтому представленная выше информация, к сожалению, больше носит рекламный характер.

Датские ученые представили свою разработку DLG-MAPPER - систему полевой топографии и анализатор почвы. Анализатор почвы состоит из датчика электропроводимости почвы EM38-DD и прибора RTK-GPS, который гарантирует точное местонахождение агрегата на поле в заданный промежуток времени. Установка смонтирована на прицепной базе посредством которых производится измерение толщины пахотного слоя и анализ почвы. В результате этого прибор создает топографическую диаграмму поля для планирования уклонов дренажной системы и карту состояния поля. Однако авторы не указывают, какие именно параметры плодородия они определяют. Данные работы находятся в стадии исследования.

Во ВНИПТИХИМе ведутся работы над созданием мобильного почвопробоотборника. Он включает раму, опорные колеса, прицепное устройство, отборник почвенных проб, закрепленный на опорном колесе, путеизмеритель с носителем информации и рабочее место лаборанта-агрохимика. Почвопробоотборник агрегируется с трактором класса 0,6 т. с.

При движении от стартовой линии поля, отмеченной реперами, почвопробоотборник с помощью путеизмерителя делит поле на элементарные участки. Координаты начала и конца каждого элементарного участка записываются на дискету. Одновременно на участках производится отбор почвенных проб, которые маркируются и затем в агрохимической лаборатории определяется содержание в них питательных веществ. Полученные данные кодируются и заносятся на дискету, которая после этого является носителем основных параметров поля: координат начала и конца каждого элементарного участка и фактического среднего содержания в них питательных веществ.

Недостатком такого способа является неизбежность ошибки при выборе количества проб и места их взятия, большие затраты ручного труда.

Имеет место другая информация о работе над устройствами для определения питательных элементов в пахотном слое почвы. Наибольший интерес представляет разработка конструкции ВНИПТИМЭСХ (рис. 2.17).

В этом аспекте определенный интерес представляют исследования, выполненные учеными ВНИПТИМЭСХ и ПО "АОМЗ" (г. Азов). Ими пред-

ложено устройство для сканирования пахотного слоя почвы непосредственно в процессе движения удобрительного агрегата по полю (рис. 2.17).

**Принцип действия сканера
для определения питательных элементов в почве**

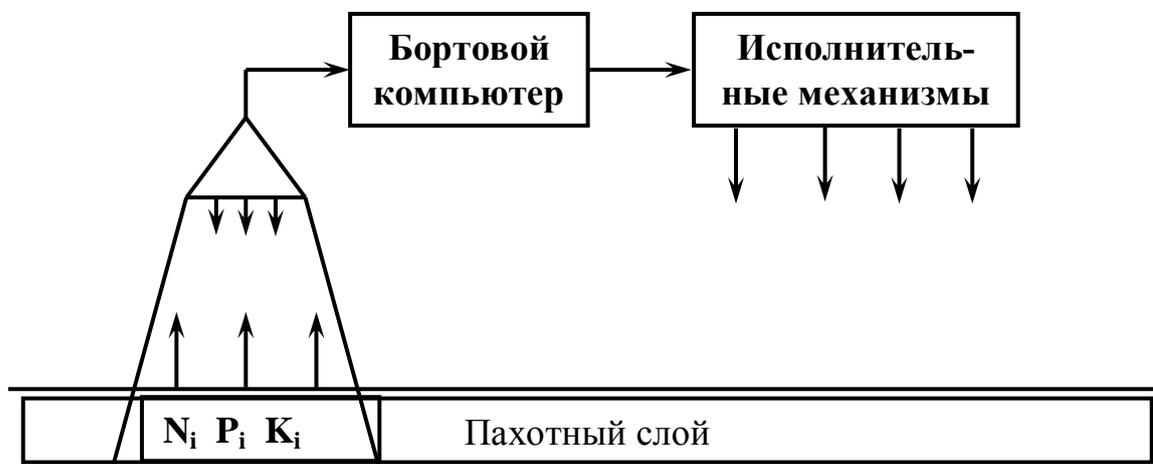


Рис. 2.17

Суть разработки заключается в том, что специальный сканер устанавливается в передней части трактора на высоте 1,0-1,5 м от уровня почвы. В процессе движения производится сканирование содержания основных питательных элементов в почве, а также количество гумуса, влажность и др. Информация обрабатывается бортовым компьютером и принятые решения в виде команд передаются исполнительному механизму.

Технологическая машина включает в себя базовую машину (трактор) в передней части которого на штанге устанавливаются специальные сканеры, а в кабине трактора - система автоматизированного управления процессом и контроля качества выполнения работ (САУ). Сзади трактора находится оборудование с удобрениями и системой исполнительных механизмов. Работает система следующим образом. При заезде на поле включается САУ, и сканеры на заданной ширине по глубине пахотного слоя определяют содержание азота (К), фосфора (Р) и калия (К). Сигнал с сенсорных датчиков на анализатор потребности в удобрениях и далее необходимые команды автоматически передаются исполнительному механизму.

Отличительной особенностью предложенной разработки является получение в динамике достоверной информации о состоянии плодородия почвы на глубине пахотного слоя с высоты 1,0-1,5 м специальным сканером, что исключает использование дорогостоящих спутниковых и других навигационных систем. При использовании указанной разработки не требуется координатная привязка агрегата на поле.

В настоящее время ВНИПТИМЭСХ совместно с ПО “Азовский оптико-механический завод” (г. Азов) проводят исследования по разработке сканера.

Проведенный анализ данных по определению variability почвенного плодородия показал, что наиболее приемлемым и достаточно корректным (достоверным) на данном этапе является определение питательных элементов в почве по урожайности сельскохозяйственных культур. Для этого необходимо взамен дорогостоящих спутниковых систем разработать устройства к зерновым комбайнам для автоматической записи урожайности убираемых сельскохозяйственных культур. При этом полученная картограмма урожайности после соответствующей обработки может стать матрицей почвенного плодородия на элементарных участках поля.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ

3.1. Общие положения

Анализ выражений, описывающих закономерности движения минеральных удобрений и их смесей по лопаткам центробежного диска, показывает, что на распределение частиц оказывают влияние:

1. Фрикционные характеристики смеси и её компонентов. Различие частиц компонентов в коэффициентах трения приводит смещению их углов схода. Особенность работы машин для внесения минеральных удобрений и их смесей является то, что фрикционные характеристики компонентов в процессе работы машины изменяются вследствие воздействий внешней среды (осадки, температура, влажность воздуха и другие) и химического взаимодействия компонентов.
2. Место подачи частицы на диск. Так как место подачи характеризуется радиусом r_0 подачи и углом λ_0 между направлением движения машины и радиус-вектором, проведенным через центр зоны питания, то их изменение оказывает влияние на положение точки схода частицы.
3. Угол ψ_0 отклонения лопаток от радиального положения. При отклонении наружного обреза лопаток в сторону вращения диска сила сопротивления движению частицы возрастает, что приводит к увеличению разности в углах схода компонентов. Необходимо учитывать, что действительное значение угла ψ_0 в процессе эксплуатации машины изменяется из-за налипания частиц на лопатки рабочего органа.
4. Угол α_0 наклона лопаток диска к горизонту. Применение конусных дисков способствует увеличению дальности метания частиц. Однако с ростом угла α_0 увеличивается сила сопротивления движению частиц и, следовательно, разность в углах схода компонентов смеси.

Зависимости, описывающие закономерности распределения частиц вдоль линии метания и по ширине полосы рассева, показывают заключить, что на распределение частиц оказывают влияние:

1. Положение сектора рассева относительно линии движения машины (угол α_{cp}). Отклонение угла α_{cp} от оптимального положения приводит к снижению равномерности рассева и, как следствие, к снижению производительности машины. На положение сектора рассева оказывают влияние фрикционные характеристики компонентов и смеси, углы ψ_0 и α_0 .

2. Величина угла $2\alpha_m$ сектора рассева. Применение узких секторов рассева снижает рабочую ширину захвата машины, а при углах $2\alpha_m$ превышающих оптимальные, снижается равномерность рассева.
3. Скорость метания частиц. С ростом скорости метания дальность полета частиц возрастает, но вместе с тем увеличивается, и разница в дальностях полета частиц компонентов смеси.
4. Величина ΔB перекрытия при смежных проходах. Выбор перекрытия ΔB оказывает влияние на качественные и количественные показатели процесса внесения удобрений. При перекрытиях меньше оптимального неравномерность рассева оказывается ниже предельного показателя, следовательно, процесс рассева не удовлетворяет агротехнической норме. При завышенных перекрытиях снижается производительность машины.
5. Воздействие ветра и рельефа местности. Влияние этих факторов приводит к ухудшению качественных показателей процесса внесения минеральных удобрений и их смесей. При воздействии ветра распределение частиц вдоль линии метания и по ширине полосы рассева зависит от скорости и направления воздушного потока. Наклоны машины, вызванные влиянием рельефа поля, оказывают влияние на положение места подачи и угла α_0 наклона лопаток к горизонту.

Таким образом, рассмотренные показатели являются в большей части зависимыми и, следовательно, эти связи необходимо учитывать при разработке и совершенствовании процесса внесения минеральных удобрений и их смесей.

3. 2. Распределительный рабочий орган с прямолинейными лопатками

Снижение чувствительности рабочего органа к изменению фрикционных свойств минеральных удобрений может быть реализовано разработкой рабочего органа с заданными направлениями движения потоков материала.

Рассмотрим рабочий орган (рис.3.1) содержащий два диска с лопатками. Диски расположены на одной оси и вращаются в противоположные стороны. Материал подаётся на лопатки 1 внутреннего диска 2, вращающегося с угловой скоростью ω_1 . Частицы первого компонента в абсолютном движении перемещаются на диске 2 по кривой A_1 , а второго – по кривой B_1 . Вследствие различия физико-механических характеристик компонентов кривые A_1 и B_1 не совпадают. Частицы первого компонента находятся на этом диске меньшее время, чем частицы второго. После схода с диска 2 частицы поступают на лопатки 3 диска 4, вращающегося с угловой скоростью ω_2 в противоположную сторону. Кривые абсолютного движения частиц компонентов, соответственно

A_2 и B_2 . Расслоение смеси на наружном диске 4 приводит к сближению углов схода компонентов.

Положение сектора рассева каждого из компонентов определяется математическим ожиданием углов α метания. Из рис. 3.1 видно, что

$$\alpha = \lambda - \pi + \omega t_1 - \omega t_2 - \theta_2, \quad (3.1)$$

где λ – угол между вектором поступательной скорости машины и радиус-вектором, проведенным через центр зоны питания;

θ_2 – угол между радиус-вектором и вектором абсолютной скорости частиц, сходящих с лопаток наружного диска;

$\omega t_1, \omega t_2$ – углы схода частиц с лопаток внутреннего, наружного дисков.

Распределительный рабочий орган

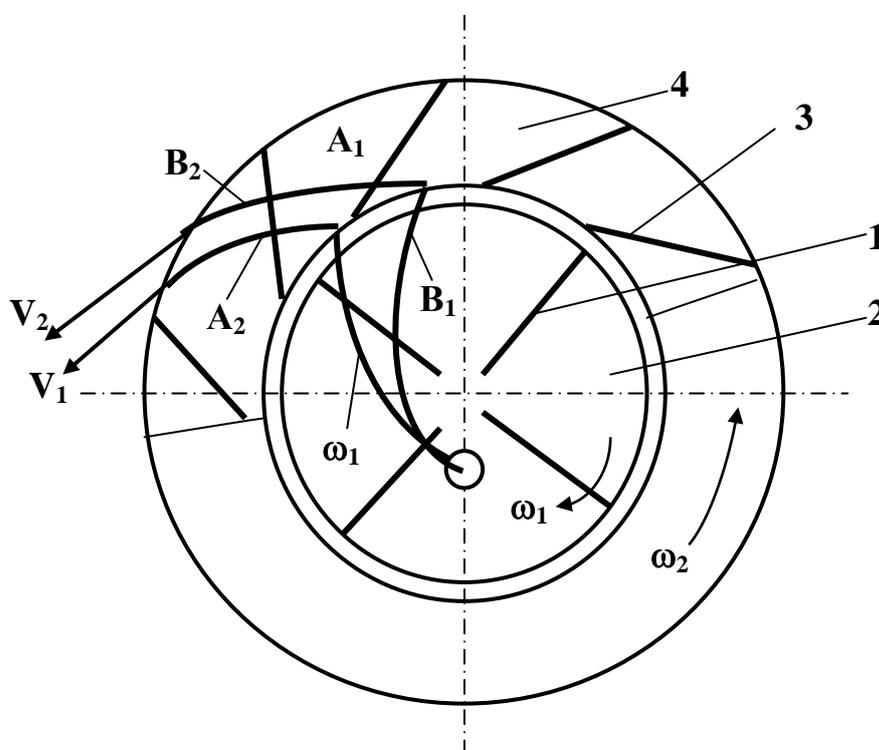


Рис. 3.1

Для определения величин, входящих в (3.1), воспользуемся теорией движения частиц по шероховатым поверхностям, разработанной академиком П.М. Василенко.

Тогда угол поворота наружного диска за время относительного движения определяется выражением

$$\omega_2 t_2 = \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \ln \frac{2\omega_2 [R_0 \cos(\varphi + \psi_{Ro}) + l_2 \cos \varphi]}{\omega_2 R_0 (1 + \sin \varphi) \cos(\varphi + \psi_{Ro}) + V_n \cos^2 \varphi} \quad (3.2)$$

и скорость относительного движения в момент схода частицы с лопаток наружного диска:

$$V_{r2} = \frac{\omega_2 [R_2 \cos(\varphi + \psi_{R0}) + l_2 \cos \varphi] \cdot [R_0 \omega_2 \cos(\varphi + \psi_{R0}) + V_H (1 - \sin \varphi)]}{\omega_2 R_0 (1 + \sin \varphi) \cos(\varphi + \psi_{R0}) + V_H \cos^2 \varphi}. \quad (3.3)$$

На рис.3.2 приведены зависимости угла $\omega_2 t_2$ схода и относительной скорости V_{r2} от начальной скорости V_H .

Зависимость угла $\omega_2 t_2$ и относительной скорости V_{r2} схода от скорости V_H поступления частицы на лопатки

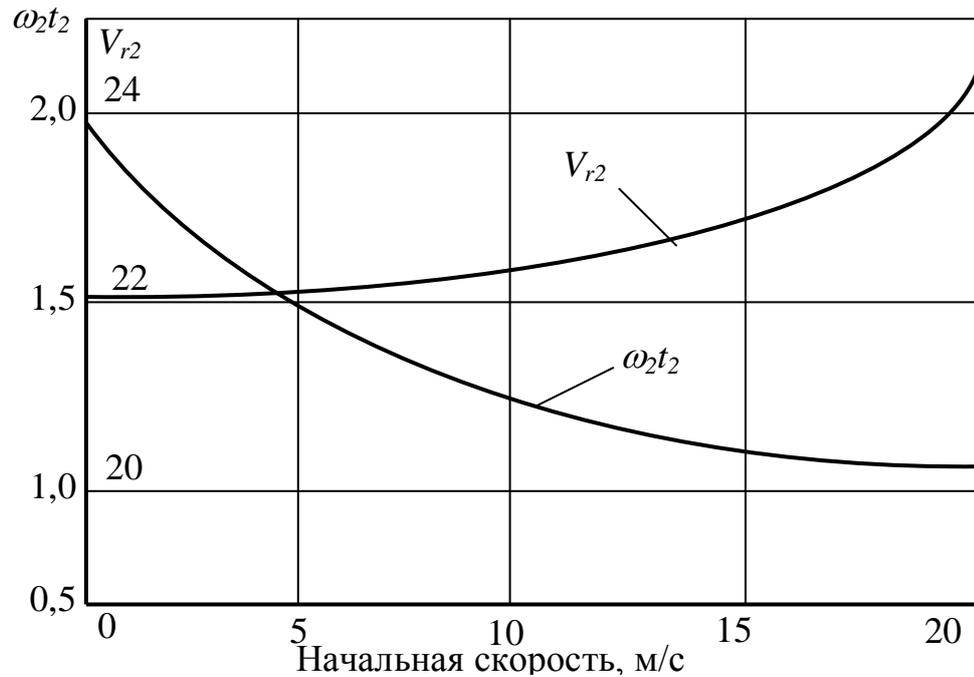


Рис. 3.2

Анализ рис. 3.2 позволяет заключить, что при изменении скорости V_H от 0 до 20 м/с угол схода уменьшается более чем в два раза, а относительная скорость схода возрастает на 11%. Следовательно, увеличение начальной скорости поступления частиц на лопатки диска не позволяет достигнуть пропорционального увеличения скорости метания частиц. Это объясняет несостоятельность попыток увеличения дальности полета частиц за счет увеличения начальной скорости.

Угол θ_2 можно определить из выражения:

$$\theta_2 = \arctg \frac{\omega_2 R_2 + V_{r2} \sin \psi_{R2}}{V_{r2} \cos \psi_{R2}}. \quad (3.4)$$

При внесении туковой смеси разность в математических ожиданиях углов метания компонентов составит

$$\Delta \alpha = \alpha_1 - \alpha_2 = \Delta \omega_1 t_1 - \Delta \omega_2 t_2 - \Delta \theta_2, \quad (3.5)$$

$$\Delta\omega_1 t_1 = \omega_1 t_{1(1)} - \omega_1 t_{1(2)};$$

где $\Delta\omega_2 t_2 = \omega_2 t_{2(1)} - \omega_2 t_{2(2)};$

$$\Delta\theta_2 = \theta_{2(1)} - \theta_{2(2)},$$

индексы (1), (2) относятся соответственно к первому, второму компонентам.

Обозначив разность в углах поворота дисков за время относительного движения компонентов величиной $\Delta\omega t = \Delta\omega_1 t_1 - \Delta\omega_2 t_2$ и подставив значения входящих величин, после преобразований получим

$$\begin{aligned} \Delta\omega t = & \frac{\cos \varphi_1}{1 - \sin \varphi_1} \ln \left[\frac{[\cos(\varphi_1 + \psi_0) + (l_1 / r_0) \cos \varphi_1]}{(1 + \sin \varphi_1) \cos(\varphi_1 + \psi_0)} \right] \times \\ & \times \left[\frac{[(1 + \sin \varphi_1) \cos(\varphi_1 + \psi_{Ro}) + (V_H / \omega_2 R_0) \cos^2 \varphi_1]}{\cos(\varphi_1 + \psi_{Ro}) + (l_2 / R_0) \cos \varphi_1} \right] - \\ & - \frac{\cos \varphi_2}{1 - \sin \varphi_2} \ln \left[\frac{[\cos(\varphi_2 + \psi_0) + (l_1 / r_0) \cos \varphi_2]}{(1 + \sin \varphi_2) \cos(\varphi_2 + \psi_{Ro})} \right] \times \\ & \times \left[\frac{[(1 + \sin \varphi_2) \cos(\varphi_2 + \psi_{Ro}) + (V_H / \omega_2 R_0) \cos^2 \varphi_2]}{[\cos(\varphi_2 + \psi_{Ro}) + (l_2 / R_0) \cos^2 \varphi_2]} \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

Анализ выражения (3.6) показывает, что на разность углов схода компонентов оказывают влияние углы ψ_0 и ψ_{Ro} постановки лопаток внутреннего и наружного дисков и следующие безразмерные параметры:

$\frac{l_1}{r_0}$ – отношение длины лопатки внутреннего диска к радиусу подачи;

$\frac{l_2}{R_0}$ – отношение длины лопатки наружного диска к радиусу его внутреннего обреза;

$\frac{V_H}{\omega_2 R_0}$ – отношение скорости поступления частиц на лопатки наружного диска к окружной скорости внутреннего обреза лопаток наружного диска.

Рассмотрим влияние вышеуказанных величин на смещение углов схода компонентов.

Угол ψ_0 постановки лопаток внутреннего диска оказывает существенное влияние на чувствительность центробежного рабочего органа к изменению фрикционных свойств удобрений. Положительные значения углов ψ_0 способствуют увеличению чувствительности аппарата к изменению фрикционных свойств удобрений, а, следовательно, способствуют росту $\Delta\omega t$ - сме-

щения углов схода компонентов смеси. Отрицательные углы ψ_0 снижают расслоение смеси по сравнению с радиальным расположением лопаток.

Из анализа влияния угла ψ_0 постановки лопаток внутреннего диска следует, что при разработке систем управления процессом распределения необходимо учитывать рост сепарирующей способности аппарата при положительных значениях углов ψ_0 постановки лопаток.

Если в качестве управляющего воздействия используется угол ψ_0 постановки лопаток, то при внесении смесей минеральных удобрений будет возрастать разность углов $\Delta\omega t$ схода компонентов. Это приводит к уменьшению равномерности распределения компонентов по поверхности поля. Данное явление будет наблюдаться и при внесении односторонних удобрений с ярко выраженными различиями в гранулометрических характеристиках, например – суперфосфат гранулированный, калийная соль и другие.

Скорость V_{0I} схода частиц с лопаток внутреннего диска связана с начальной скоростью V_n движения частиц по лопаткам наружного диска выражением (3.4). Учитывая, что наружный и внутренний диски вращаются в противоположные стороны, то с ростом V_n возрастает сила удара частиц о лопатки наружного диска.

Так как при ударе происходит разрушение гранул, то необходимо спроектировать рабочий орган таким образом, чтобы максимально снизить или устранить ударное взаимодействие частиц с лопатками как внутреннего, так и наружного диска.

Снижение скорости V_{0I} схода частиц с лопаток внутреннего диска может быть достигнуто уменьшением окружной скорости $\omega_I R_I$ и применением лопаток с отрицательными углами ψ_{RI} . Снижение радиуса R_I внутреннего диска ограничено необходимостью обеспечения требуемой подачи и величинами l_I и r_0 . Минимальное значение угловой скорости ω_I определено из условия подхватывания частиц, поступающих в межлопаточное пространство, “на лету”.

$$\omega_I \geq \frac{\pi \cdot V_u}{h_l z_I} + \sqrt{V_u^2 + 4g\pi^2 h_l}, \quad (3.7)$$

где V_u – скорость истечения материала на уровне верхнего обреза лопаток; h_l – высота лопаток; z_I – число лопаток.

Из формулы (3.7) следует, что для диска с числом лопаток $z_I=4$ и их высотой $h_l=0,05$ м при скорости истечения $V_u=1$ м/с получим $\omega_I \geq 38,8$ 1/с.

С другой стороны снижение влияние удара может быть достигнуто установкой на наружном диске лопаток с отрицательными углами ψ_{Ro} .

Анализируя взаимодействие частицы с лопаткой наружного диска (рис. 3.36) определим радиус наиболее удаленной от оси вращения диска точки встречи. Учитывая, что за время t_g полета частицы в межлопаточном пространстве она переместится в направлении вектора V_I на расстояние $V_I t_g$, получим

$$R_g = \sqrt{R_0^2 + (V_{01}t_g)^2 + 2R_0 \cdot V_{01} \cdot t_g \cos \theta_1}. \quad (3.8)$$

В выражении (3.8) неопределенным является время t_g . Угол поворота диска за время t_g связан с углом $2\pi/z_2$ между смежными лопатками зависимостью: $\alpha_n = \frac{2\pi}{z_2} - \omega_2 t_g$.

Тогда время t_g определится из выражения:

$$t_g = \frac{2R_0 \cos \frac{\alpha_n}{2} \cos \left(\frac{\alpha_n}{2} - \psi_{Ro} \right)}{V_{01} \sin(\theta_1 - \alpha_n)}. \quad (3.9)$$

В некоторых частных случаях выражение (3.9) имеет вид:

При $\psi_{Ro}=0$ – лопатка наружного диска установлена радиально

$$t_g = \frac{2R_0 \cos^2 \frac{\alpha_n}{2}}{V_{01} \sin(\theta_1 - \alpha_n)};$$

При $\psi_{Ro}=-\theta_1$ – лопатка расположена параллельно вектору V_{01}

$$t_g = \frac{2\pi}{z_2 \omega_2}.$$

К анализу взаимодействия частиц с лопатками наружного диска

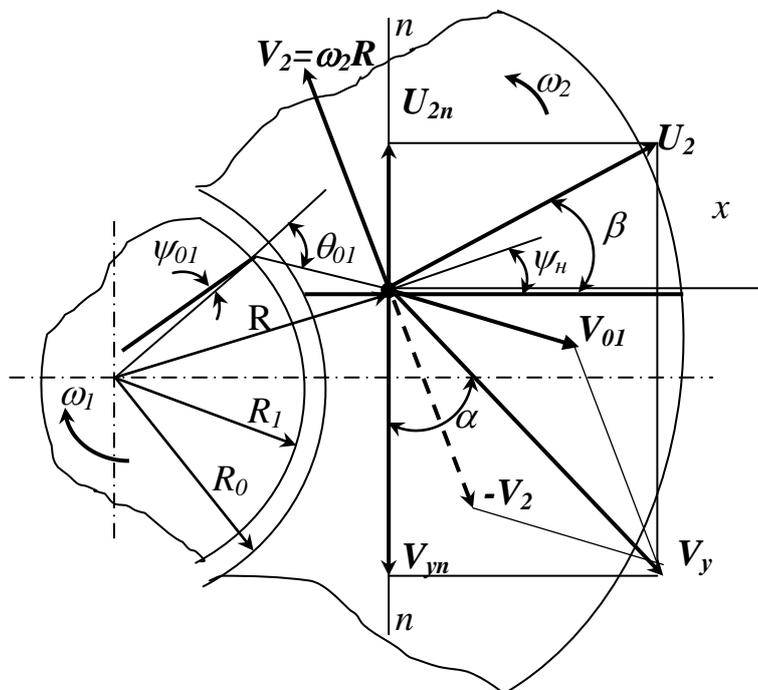


Рис. 3.3

Подставив в (3.8) время t_e из (3.9) определится значение радиуса $R_{\text{вmax}}$. Ударное взаимодействие частицы с лопаткой наружного диска возможно при значениях радиуса R , заключенного в интервале:

$$R_0 \leq R \leq R_{\text{вmax}}.$$

Анализируя ударное взаимодействие частицы с лопаткой наружного диска установлено, что частица отразится от поверхности лопатки под углом γ , тангенс которого равен

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{|U_{1n}|}{|U_{1\tau}|} = \frac{\omega_2 R \cos \psi_R (1+k) + V_{01} k \sin \beta}{V_{01} \cos \beta [1 - f(1+k) \operatorname{tg} \beta] - \omega_2 R \cos \psi_R (\operatorname{tg} \psi_R + 1+k)}, \quad (3.10)$$

где k – коэффициент восстановления частиц;

f – коэффициент трения частиц о лопатку наружного диска.

Учитывая, что в движении по лопаткам участвуют не единичные частицы, а поток частиц “сыпучее тело”, то наиболее вероятной для ударного взаимодействия является начальная часть лопатки.

Отметим некоторые частные случаи, возможные при проектировании наружного диска распределительного рабочего органа:

$$\text{Так при } \psi_{R_0} = \frac{\pi}{2} - \theta_1 \quad \operatorname{tg} \gamma = - \left[1 + \frac{V_{01} k}{\omega_2^2 R_0 \sin \psi_{R_0} (1+k)} \right],$$

то есть частица отразится от поверхности лопатки наружного диска и покинет межлопаточное пространство. Это недопустимо, так как приводит к нарушению технологического процесса работы аппарата.

При $\psi_{R_0} = 0$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\omega_2 R_0 (1+k) + V_{01} k \sin \theta_1}{V_{01} \cos \theta_1 [1 - f(1+k) \operatorname{tg} \theta_1] - \omega_2 R_0 [(1+k) + \operatorname{tg} \theta_1]},$$

и при $\psi_{R_0} = -\theta_1$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\omega_2 R_0 (1+k)}{V_{01} + \omega_2 R_0 \cos \theta_1 [(1+k) + \operatorname{tg} \theta_1]}.$$

Наибольший практический интерес представляет случай равенства нулю угла γ . Из (3.10) следует, что $\gamma = 0$, если числитель дроби равен нулю, то есть $\omega_2 R_0 (1+k) \cos \psi_{R_0} + V_{01} k \sin \beta = 0$.

Учитывая, что $\beta = \theta_1 + \psi_{R_0}$ и решив относительно ψ_{R_0} , получим

$$\psi_{R_0} = - \left[\arcsin \frac{\omega_2 R_0 (1+k) \cos \psi_{R_0}}{V_{01} k} + \theta_1 \right]. \quad (3.11)$$

Если условие (3.11) не выполняется, то частица, отразившись от поверхности лопатки под углом γ , будет перемещаться в межлопаточном пространстве до встречи с набегающей лопаткой или покинет межлопаточное пространство наружного диска.

Однако, как отмечалось ранее, для обеспечения требуемого характера движения необходимо создать условия безотрывного движения частиц, как по лопаткам наружного, так и внутреннего дисков. При использовании прямолинейных лопаток углы ψ_{R2} постановки лопаток на наружном обресе диска принимают отрицательные значения, что приводит к снижению скорости метания частиц. Устранение этого недостатка может быть осуществлено путем установки на наружном диске криволинейных лопаток. При этом на начальном участке лопаток угол ψ_{R0} должен быть близким к значению, определяемому выражением (3.11).

Увеличение угловой скорости диска может привести к отрыву частиц от поверхности лопатки. Условие безотрывного движения частицы по лопатке наружного диска имеет вид: $\omega_2 \leq \omega_{кр} = 2V_R / (R \cdot \sin \psi_R)$.

При $\omega_2 > \omega_{кр}$ частица отрывается от поверхности лопатки. Увеличение критической скорости $\omega_{кр}$ может быть достигнуто за счет применения на наружном диске лопаток криволинейной формы.

3.3. Анализ распределения частиц рабочим органом с криволинейными лопатками на наружном диске

Рассмотрим случай установки на наружном диске лопаток криволинейной формы. Пусть рабочая поверхность лопатки в плане выполнена в виде кривой второго порядка – окружности, радиусом r_l . На рис. 3.4 видно, что угол β_l раствора лопатки равен:

$$\beta_l = 2 \operatorname{arctg} \frac{R_2 \sin \psi_{R2} - R_0 \sin \psi_{R0}}{R_2 \cos \psi_{R0} + R_0 \cos \psi_{R0}}, \quad (3.12)$$

а радиус лопатки связан с её параметрами выражением

$$r_l = \frac{R_0 \sin(\psi_{R2} - \psi_{R0} - \beta_l)}{2 \sin\left(\frac{\beta_l}{2} - \psi_{R2}\right) \sin \frac{\beta_l}{2}}. \quad (3.13)$$

Из анализа сил, действующих на частицу при её движении по криволинейной лопатке, получено нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка, которое после преобразований имеет вид:

$$\zeta'' = \omega_2^2 \left[c \cdot \sin \beta - f \left(\frac{2V_r}{\omega_2} - c \cdot \cos \beta + r_l + \frac{g}{\omega_2^2} \right) \right], \quad (3.14)$$

$$\text{где} \quad c = \sqrt{r_l^2 + R_0^2 - 2r_l R_0 \sin \psi_{R0}}; \quad \beta = \frac{\xi}{r_l} + \beta_0;$$

$$\beta_0 = \arcsin \frac{R_0 \cos \psi_{R0}}{c}.$$

**К определению геометрических параметров лопатки
наружного диска**

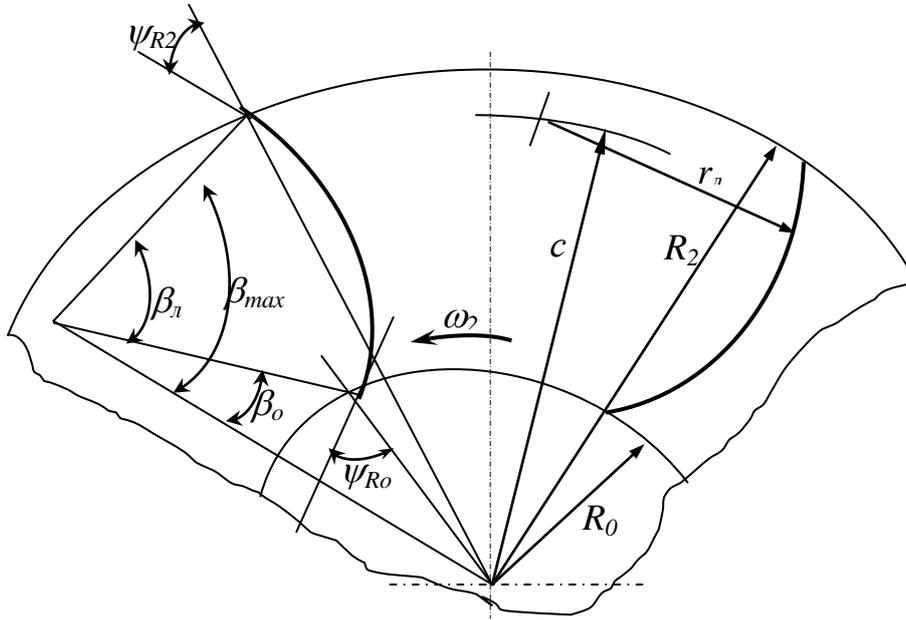


Рис. 3.4

Решение (3.14) можно выполнить одним из численных методов, например, методом Рунге-Кутты. Для чего данное уравнение представим в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \xi' = V_r \\ V_r' = \omega_2^2 \left[c \cdot \sin \beta - f \left(\frac{2V_r}{\omega_2} - c \cdot \cos \beta + r_{\text{л}} + \frac{g}{\omega_2^2} \right) \right] \end{cases} \quad (3.15)$$

Из решения системы(3.15) при начальных условиях: *при* $t=0$ $\xi = \xi_0$,

$V_r = V_n$ находится время t_2 движения частицы по лопатке на пути, равном $\xi_{\text{max}} = r_{\text{л}} \beta_{\text{л}}$ и относительная скорость V_r схода частицы.

Особенностью работы данного рабочего органа является то, что частицы движутся вначале по лопаткам наружного, а потом внутреннего дисков. Это не позволяет применять зависимости для нахождения угла сектора рассева. Так как частицы поступают на лопатки наружного диска на радиусе $R_0 \dots R_{\text{gmax}}$, то происходит увеличение угла сектора рассева на величину $\Delta\alpha_m$.

Приращение угла $\Delta\alpha_m$ сектора рассева определим из выражения:

$$\Delta\alpha_m = \omega_2 t_{2(R=R_0)} - \omega_2 t_{2(R=R_{\text{gmax}})}. \quad (3.16)$$

Из рис. 3.4 следует, что расстояние R_{gmax} от центра диска до наиболее удаленной точки встречи частицы с лопаткой равно

$$R_{\text{gmax}} = \sqrt{R_0^2 + (V_n t_{\text{e}})^2 + 2R_0 V_n t_{\text{e}}}, \quad (3.17)$$

где

$$t_{\text{в}} = \frac{1}{V_{\text{н}}} \sqrt{r_{\text{л}}^2 + c^2 - 2r_{\text{л}} \cdot c \cdot \cos\left(2 \arcsin \frac{b}{2r_{\text{л}}}\right) - R_0 - 2R_0 V_{\text{н}} t_{\text{в}} \cos \theta_1};$$

$$b = \sqrt{a^2 + (V_{\text{н}} t_{\text{в}})^2 - 2a \cdot V_{\text{н}} t_{\text{в}} \sin\left(\frac{\alpha_{\text{в}}}{2} - \theta_1\right)}; \quad a = 2R_0 \sin \frac{\alpha_{\text{в}}}{2};$$

$$\alpha_{\text{в}} = \frac{2\pi}{z_2} - \omega_2 t_{\text{в}}.$$

За время $t_{\text{в}}$ частица переместится вдоль лопатки на расстояние $\xi_{\text{в}}$, равное:

$$\xi_{\text{в}} = r_{\text{л}}(\beta_{\text{в}} - \beta_0),$$

где $\beta_{\text{в}} = \arccos \frac{r_{\text{л}}^2 + c^2 - R_{\text{вmax}}^2}{2r_{\text{л}} \cdot c}.$

Зная R_0 и определив значение $R_{\text{вmax}}$, решается система уравнений (3.17), используя новые начальные условия и вычисляется время t_2 . Зная время t_2 можно определить угол поворота наружного диска за время относительного движения частицы после её встречи с лопаткой.

Тогда приращение угла $\Delta\alpha_m$ сектора рассева

$$\Delta\alpha_m = \omega_2 t_{2(R=R_0)} - \omega_2 t_{2(R=R_{\text{вmax}})}. \quad (3.18)$$

Анализ зависимостей (рис. 3.5) показывает, что с увеличением отношения $R_{\text{вmax}}/R_0$ приращение угла $\Delta\alpha_m$ сектора рассева возрастает.

К определению радиуса $R_{\text{вmax}}$ наиболее удаленной точки встречи частицы с лопаткой наружного диска

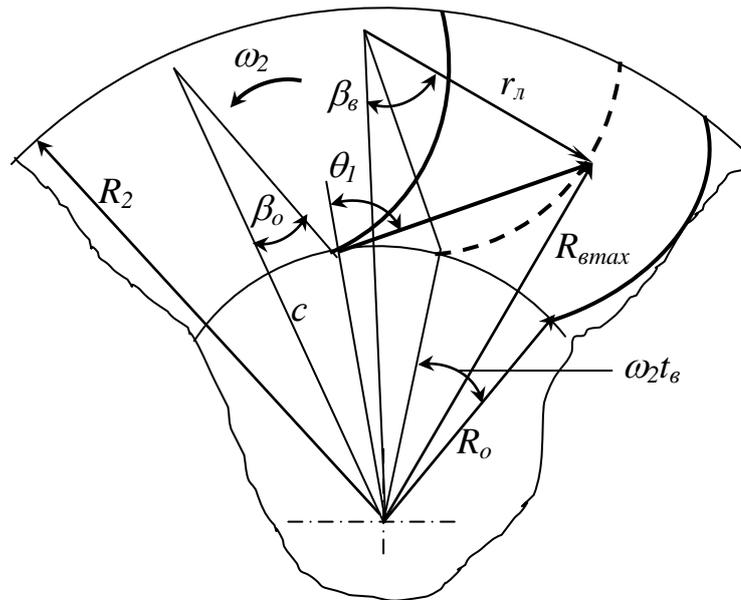


Рис. 3.5

Приращение угла $\Delta\alpha_m$ сектора рассева зависит от угловой скорости наружного диска и начальной скорости V_n поступления частиц в зону лопаток наружного диска. Так при угловой скорости $\omega_2=60$ 1/с и начальной скорости $V_n=5$ м/с приращение угла $\Delta\alpha_m$ сектора рассева на $0,25$ рад. Увеличение угловой скорости ω_2 до 80 1/с способствует росту приращения угла $\Delta\alpha_m$ сектора рассева до $0,37$ рад, а при $\omega_2=100$ 1/с это приращение составило $0,55$ рад. Увеличение начальной скорости V_n с 5 м/с до 10 м/с при угловой скорости $\omega_2=80$ 1/с вызвало снижение приращения угла $\Delta\alpha_m$ сектора рассева на $0,12$ рад.

Из изложенного следует, что если необходимо иметь широкие секторы рассева необходимо снижать начальную скорость, увеличивать угловую скорость ω_2 и число лопаток на наружном диске.

Аналитические исследования распределительного рабочего органа с прямолинейными лопатками на наружном диске позволили установить, что на расслоение минеральных удобрений и их смесей оказывают влияние безразмерные параметры:

l_1/r_0 – отношение рабочей длины лопатки внутреннего диска к радиусу центра зоны питания;

l_2/R_0 – отношение рабочей длины лопатки наружного диска к радиусу её внутреннего обреза;

$V_n/(\omega_2 R_0)$ – отношение начальной скорости частиц, поступающих на лопатки наружного диска к окружной скорости внутреннего обреза лопаток этого диска.

Влияние этих параметров на расслоение смесей нами рассмотрено для случая установки на наружном диске прямолинейных лопаток. Учитывая идентичность процессов движения смесей по лопаткам прямолинейной и криволинейной форм возникает возможность оптимизации параметров распределительного рабочего органа с криволинейными лопатками выполнить по этим или близким к ним факторам.

Влияние конструктивных параметров рабочего органа (число лопаток z_1 и z_2 , углы ψ_0 , ψ_{R_0} , ψ_{R_2} постановки лопаток, радиусы дисков R_1 , R_0 и R_2) можно исключить, приняв их оптимальные значения на основании результатов аналитических исследований.

Анализ работы распределительного рабочего органа с прямолинейными лопатками на наружном диске показывает, что начальная скорость поступления частиц на лопатки наружного диска в основном зависит от радиуса R_1 этого диска и его угловой скорости ω_1 , а линейная скорость $\omega_2 R_0$ – от радиуса R_0 и угловой скорости ω_2 . На основании этого оптимизация параметров распределительного рабочего органа с криволинейными лопатками на наружном диске может быть выполнена по следующим безразмерным комплексам:

R_1/r_0 – отношение наружного радиуса внутреннего диска к радиусу центра зоны питания;

R_2/R_0 – отношение наружного и внутреннего радиусов наружного диска;

ω_1/ω_2 – отношение угловых скоростей внутреннего и наружного дисков.

Преобразование факторов в безразмерные позволило значительно сократить объём экспериментальных исследований при учете влияния основных геометрических (R_1, R_0, R_2) и кинематических (ω_1, ω_2) параметров распределительного рабочего органа. Факторы и уровни их варьирования приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 Факторы и уровни их варьирования

Обозначение	R_1/r_0	R_2/R_0	ω_1/ω_2	Критерий оптимизации
	x_1	x_2	x_3	y
Верхний уровень (+)	2,50	1,75	1,00	
Основной уровень (0)	2,00	1,25	0,75	
Нижний уровень (-)	1,50	0,75	0,50	
Интервал варьирования	0,50	0,50	0,25	

Необходимость проведения данного эксперимента обусловлена тем, что при анализе движения частиц смеси по лопаткам рабочего органа не учитывалось механическое взаимодействие компонентов. Такая идеализация процесса позволила выявить факторы, влияющие на расслоение смесей, а также дать, в первом приближении, направление поиска оптимальных параметров.

Выбор интервалов варьирования факторов и центр эксперимента выбирался на основании результатов аналитических исследований. За критерий оптимизации y принято смещение углов $\Delta\omega t$ схода компонентов.

Описание поверхности отклика выполнено уравнением второго порядка, имеющего вид:

$$y = b_0 + \sum_k b_i x_i + \sum_{i \leq j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_k b_{ii} x_i^2, \quad (3.19)$$

где b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коэффициенты регрессии;
 k – число факторов.

Для оценки коэффициентов регрессии в выражении (3.19) было применено ортогональное планирование второго порядка. Матрица ортогонального плана второго порядка приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Уровни варьирования факторов			Значение критерия оптимизации $\bar{y} = \Delta\omega t(\pi/180), \text{ рад}$
	x_1	x_2	x_3	
1	+1	+1	+1	2,30
2	+1	+1	-1	1,63
3	+1	-1	+1	5,50
4	+1	-1	-1	4,20
5	-1	+1	+1	3,50
6	-1	+1	-1	6,3
7	-1	-1	+1	1,43
8	-1	-1	-1	2,20
9	0	0	0	0,77
10	-1,215	0	0	3,37
11	+1,215	0	0	3,47
12	0	-1,215	0	1,97
13	0	+1,215	0	3,10
14	0	0	-1,215	0,33
15	0	0	+1,215	0,73

Коэффициенты регрессии при ортогональном планировании определяются независимо друг от друга по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}, \quad (3.20)$$

где i – порядковый номер столбца матрицы эксперимента.

Значимость коэффициентов регрессии рассчитывалась по t - критерию с помощью выражения

$$\Delta b_i = \frac{t_{Sy}}{\sqrt{N}}. \quad (3.21)$$

Описание поверхности отклика выполнено уравнением вида:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_{11} x_1^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_2 x_2 + b_{22} x_2^2 + b_{13} x_1 x_3 + \\ + b_{23} x_2 x_3 + b_3 x_3 + b_{33} x_3^2, \quad (3.22)$$

$$x_1 = \frac{\frac{R_1}{r_0} - 2,00}{0,50}; \quad x_2 = \frac{\frac{R_2}{R_0} - 1,25}{0,50};$$

где

$$x_3 = \frac{\frac{\omega_1}{\omega_2} - 0,75}{0,25}; \quad y = \Delta\omega t(\pi/180), \text{ рад.}$$

Значения коэффициентов регрессии и их доверительные интервалы приведены в табл. 3.3.

Из таблицы 3.3 следует, что коэффициенты b_1 и b_3 незначимы и при дальнейшем анализе они не рассматривались.

Полученное уравнение регрессии изучалось методом двумерных сечений. Для чего оно подвергалось каноническому преобразованию, которое в стандартной форме имеет вид:

Таблица 3.3 Значения коэффициентов регрессии и их доверительные интервалы

Обозначение	Величина	Доверительный интервал	Обозначение	Величина	Доверительный интервал
b_0	0,8843	$\pm 0,447$	b_{22}	1,091	$\pm 0,170$
b_1	0,0294	$\pm 0,107$	b_{33}	-0,2663	$\pm 0,170$
b_2	0,1619	$\pm 0,107$	b_{12}	-1,493	$\pm 0,125$
b_3	-0,1017	$\pm 0,107$	b_{13}	0,6925	$\pm 0,125$
b_{11}	1,690	$\pm 0,170$	b_{23}	-0,3325	$\pm 0,125$

$$y - 0,8843 = 2,252x_1^2 + 0,5895x_2^2 - 0,3270x_3^2. \quad (3.23)$$

Из (3.23) следует, что поверхность отклика является однополостным гиперболоидом, вытянутым вдоль оси x_3 .

Уменьшение соотношения угловых скоростей дисков способствует снижению расслоения смесей и расширению диапазона малой чувствительности рабочего органа к изменению углов трения компонентов. Увеличение угловой скорости внутреннего диска способствует росту расслоения смесей, а при уменьшении ω_1 до $\omega_1/\omega_2=0,5$ смещение углов схода компонентов не превышает 0,05 рад во всем диапазоне изменения параметра R_0/r_0 (x_1).

С целью оценки влияния параметров R_0/r_0 (x_1) и R_2/R_0 (x_2) на расслоение смесей рассмотрим двумерное сечение поверхности отклика при фиксировании соотношения угловых скоростей на нижнем уровне ($\omega_1/\omega_2 = 0,5$).

Линии равных уровней представляют собой эллипсы (рис. 3.6) соответствующие каноническому уравнению:

$$y - 0,5350 = 2,195x_1^2 + 0,5858x_2^2, \quad (3.24)$$

**Двухмерное сечение поверхности отклика
при соотношении угловых скоростей $\omega_1/\omega_2=0,5$ ($x_3=-1$)**

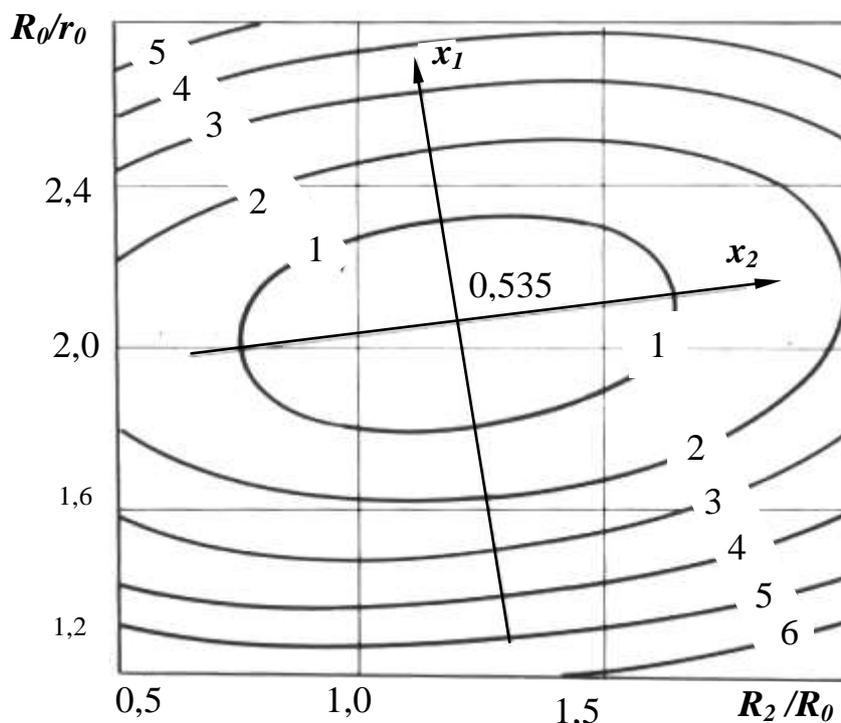


Рис. 3.6

Минимальное значение критерия оптимизации $\Delta\omega t=0,0093 \text{ рад}$ ($0,535^\circ$), а максимальное значение критерия оптимизации не превышает $\Delta\omega t=0,1 \text{ рад}$ почти во всем диапазоне изменения параметров x_1 и x_2 .

Снижение кинематического режима до $\omega_1/\omega_2=0,5$ способствует уменьшению скорости поступления частиц на лопатки наружного диска, что улучшает условия взаимодействия частиц с лопаткой.

Учитывая необходимость снижения чувствительности аппарата к изменению фрикционных свойств компонентов, наиболее рациональным является выбор параметра ω_1/ω_2 в пределах $0,5\dots 0,6$, а значение параметра R_2/R_0 равным $1,0\dots 1,5$. При таких значениях указанных параметров смещение секторов рассева компонентов смеси не превысит $0,1 \text{ рад}$ при изменении параметра R_0/r_0 от $1,25$ до $2,75$.

Реализация оптимальных параметров рабочего органа позволит исключить настройку машины на заданное положение сектора рассева при изменении вида вносимых удобрений или изменения фрикционных характеристик из-за влияния внешних воздействий.

Для проверки правильности теоретических положений и выводов был спроектирован и изготовлен опытный образец распределителя минеральных удобрений, оборудованный разработанным рабочим органом. Производствен-

ная проверка на полях УОХ «Зерновое» показала эффективность использования данного рабочего органа. При этом установлено, что распределение смеси и её компонентов по поверхности поля имеет вид симметричных, относительно оси движения машины, кривых (рис. 3.7).

Распределение смеси и её компонентов по ширине рассева машины 1РМГ-4 с экспериментальным рабочим органом

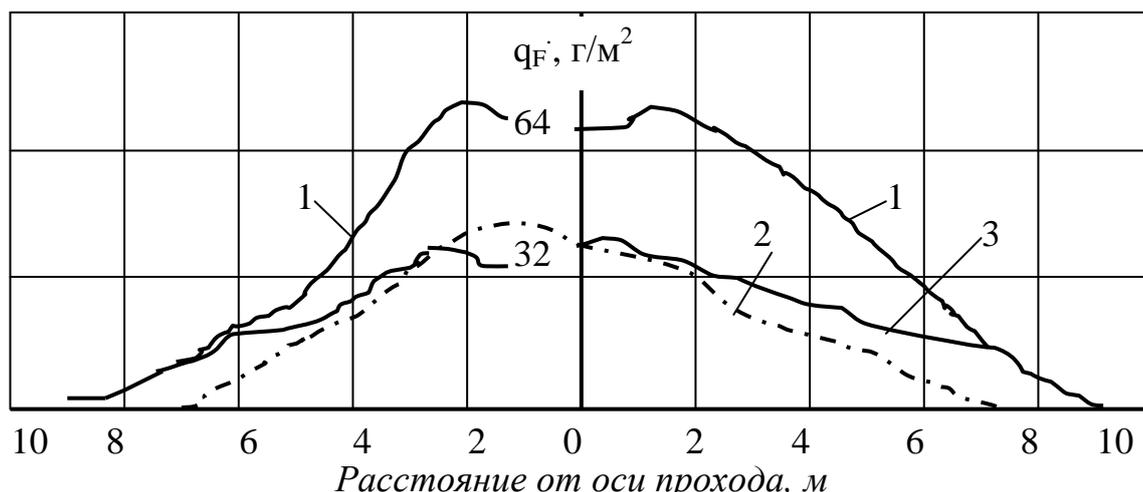


Рис. 3.7

Ширина рассева аммиачной селитры (кривая 2) составила 14 м, а ширина рассева суперфосфата гранулированного (кривая 3) – 18 м.

Неравномерность распределения по общей ширине рассева для смеси (кривая 1) составила 49,7%, аммиачной селитры – 42,5%, суперфосфата гранулированного – 39,4%.

При выборе перекрытия по азотному компоненту рабочая ширина рассева составила 12,5 м, а неравномерность распределения: для аммиачной селитры – 25,1%; для смеси – 16,5%; для суперфосфата гранулированного – 11,0%.

При рабочей ширине рассева 11 м неравномерность распределения составила: для смеси 9,4%; для аммиачной селитры – 11,7%; для суперфосфата гранулированного – 12,0%.

Отношение рабочей к общей ширине рассева составило 0,61. Это удовлетворяет требованиям отраслевого стандарта.

3.4. Создание равномерного распределения частиц в секторе рассева центробежного диска

При локальном внесении минеральных удобрений необходимо обеспечить равномерное распределение частиц по углу сектора метания. Приме-

нение центральной загрузки аппарата, позволяющее создать такое распределение, сопряжено с рядом сложностей при эксплуатации машины. К ним, в первую очередь варьирование координат центра зоны питания из-за влияния случайных воздействий (колебания машины, налипание удобрений на лопатки и на туконаправитель и др.). Как показывают результаты наших исследований и других авторов, незначительное отклонение центра зоны питания от оси вращения диска приводит к нарушению закона равномерного распределения и к расслоению смеси. Реализация закона постоянной или близкой к ней плотности распределения удобрений по углу сектора рассева может быть осуществлена за счет управления потока материала, поступающего на центробежный диск.

Рассмотрим рабочий орган, предназначенный для локального внесения минеральных удобрений и их смесей. Он содержит центробежный диск 1 (рис. 3.8) с лопатками 2 и вращающуюся вокруг оси диска 1 направляющую воронку 3.

Радиус подачи остаётся постоянным и не зависит от наклонов аппарата, колебаний подачи и других воздействий. Частицы, покидая направляющую воронку, поступают на лопатки 2 диска 1, вращающегося с угловой скоростью ω_2 .

При локальном внесении удобрений необходимым условием является постоянство нормы высева и надёжность выполнения технологического процесса.

Учитывая, что центробежные рабочие органы хорошо приспособлены к высеву минеральных удобрений, но обладают чувствительностью к выбору места подачи, особенно при малых радиусах подачи, то в данном рабочем органе подача материала на лопатки диска осуществляется через направляющую воронку 3, вращающуюся с угловой скоростью ω_1 .

Так как плотность распределения частиц на выходе воронки постоянная, то распределение частиц в секторе рассева центробежного диска будет соответствовать закону равномерной плотности. Получение требуемого закона распределения удобрений по отсекам улавливателя 4 достигается выбором центрального угла β_i отсеков. Если в каждый отсек улавливателя 4 должна поступать одинаковая доза q_i , то

$$\beta_i = 2\pi/z,$$

где z – число отсеков улавливателя.

Так как работа центробежного диска аналогична работе наружного диска распределительного рабочего органа, то для обоснования параметров данного рабочего органа рассмотрим движение частиц удобрений по направляющей воронке.

Схема распределителя минеральных удобрений

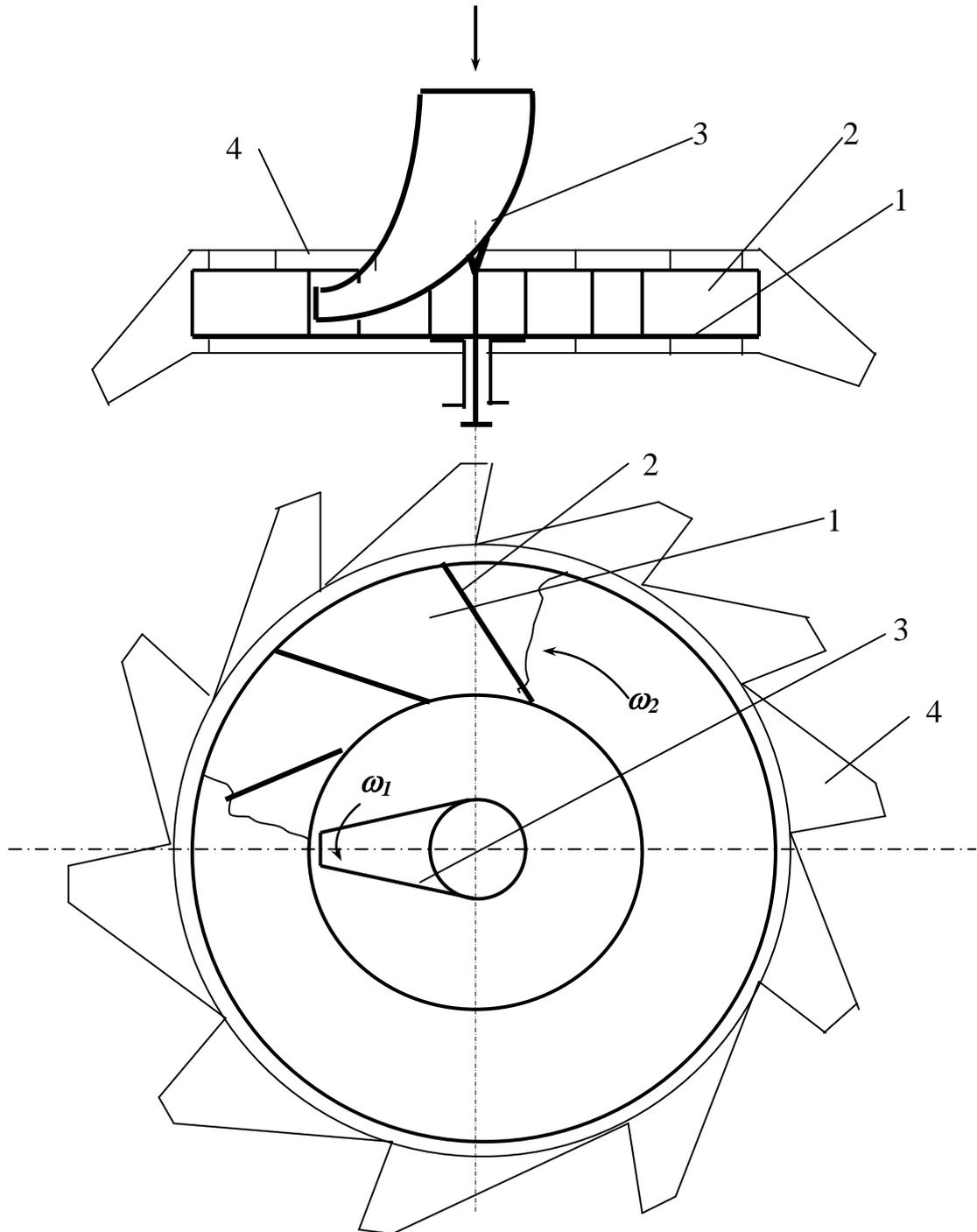


Рис. 3.8

Пусть направляющая воронка в осевом сечении описана окружностью, радиусом R_g . Из анализа сил, действующих на частицу (рис. 3.9), движущуюся по воронке, получено нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка

$$\xi'' = g \cos \gamma - 2f\omega\xi' - \omega^2 r \sin \gamma - fg \sin \gamma - f\omega^2 r \cos \gamma, \quad (3.25)$$

где путь ζ , проходимый частицей по основанию воронки, связан с углом γ выражением: $\gamma = \zeta / R_6$.

К анализу движения частицы по поверхности воронки

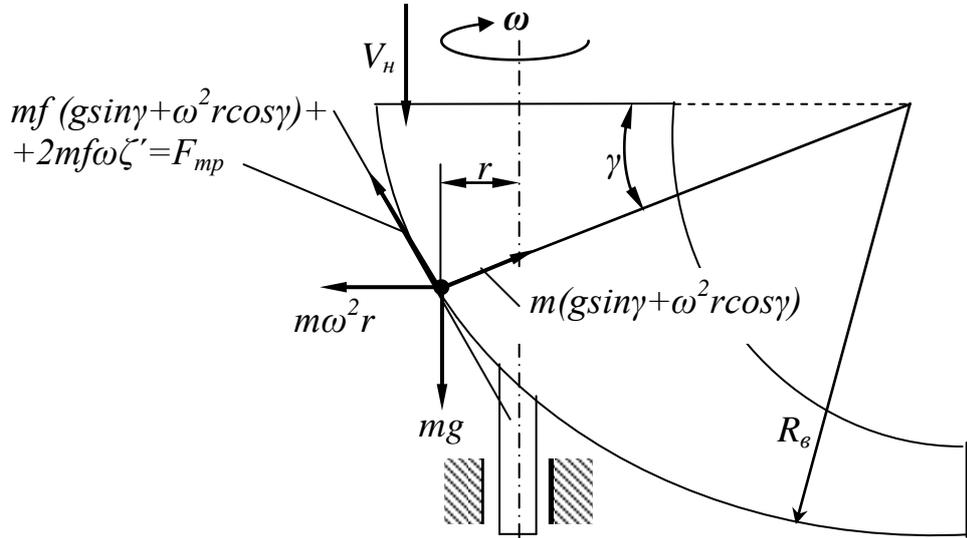


Рис. 3.9

Расстояние r от оси вращения до точки связано с диаметром d_6 верхней части воронки и её параметрами выражением:

$$r = \frac{d_6}{2} - R_6(1 - \cos \gamma).$$

Приближенное решение дифференциального уравнения можно выполнить численными методами, для чего представим (3.25) в виде системы:

$$\begin{cases} \xi' = V_r \\ V_r' = \omega^2 \left[\frac{g}{\omega^2} \cos \gamma - f \left(\frac{2V_r}{\omega} + r \cos \gamma + \frac{g}{\omega^2} \sin \gamma \right) - r \sin \gamma \right] \end{cases} \quad (3.26)$$

Из решения системы (3.76), используя начальные условия:

- при $t=0$ $\zeta=0$, $V_r = V_n$ найдем относительную скорость V_{r0} выхода частицы из воронки.

Абсолютная скорость частицы определится из геометрической суммы векторов относительной V_{r0} и переносной $V_e = \omega r_{max}$. Расстояние r_{max} определится из выражения: $r_{max} = R_6(1 - \sin \gamma_{max}) - (d_6/2)$.

Частицы будут покидать воронку под углом θ_6 (рис. 3.10), равным

$$\theta_6 = \arctg \left(\frac{\omega r_{max}}{V_{r0}} \right). \quad (3.27)$$

**К определению угла постановки лопатки
центробежного диска**

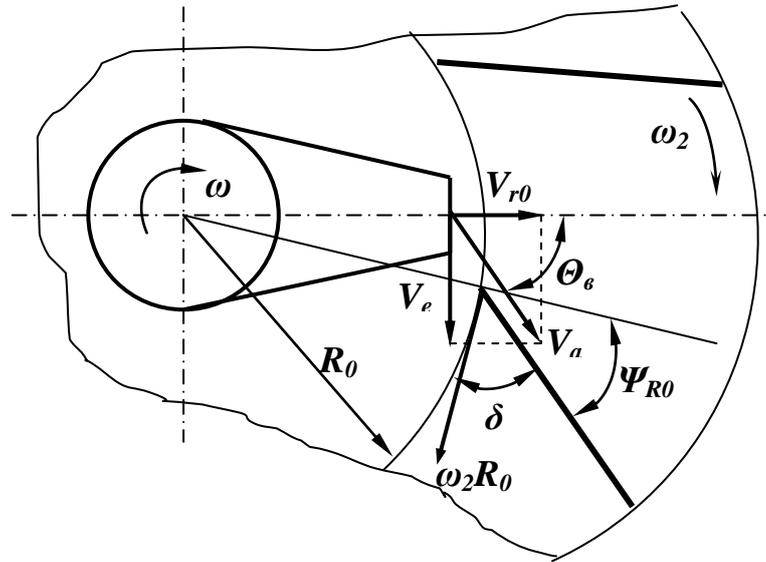


Рис. 3.10

Для снижения силы удара частиц о лопатки центробежного диска необходимо, чтобы угол $\delta = (\pi/2) - \psi_{R0}$ был близок к углу θ_e . Из условия равенства углов, получим:

$$\psi_{R0} = \frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{\omega r_{\max}}{V_{r0}}\right). \quad (3.28)$$

Учитывая, что работа рассматриваемого аппарата аналогична работе двухдискового распределительного рабочего органа, рассмотренного выше, но отличается тем, что подача материала на внутренний диск является центральной.

При центральной подаче распределение частиц является круговым. Все углы схода равновероятны. Это позволяет исключить расслоение туковых смесей, как в секторе рассева воронки, так и в секторе рассева центробежного диска.

При встречном вращении воронки и центробежного диска на диске целесообразно устанавливать лопатки криволинейной формы (рис. 3.11) с углом ψ_{R0} постановки на внутреннем обресе близким, к приведенному в формуле (3.11).

Угол ψ_{R2} постановки лопатки на наружном обресе центробежного диска выбирается из условия обеспечения требуемого соотношения относительной и окружной скоростей.

**К определению угла постановки лопаток
центробежного диска при встречном вращении**

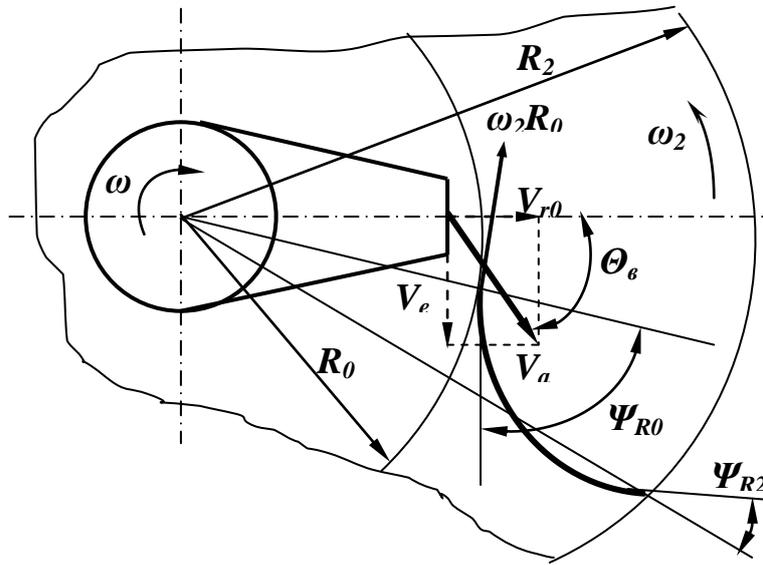


Рис. 3.11

Результаты экспериментальных исследований распределения частиц гранулированного суперфосфата при совпадающем (кривая 1) и встречном (кривая 2) направлениях вращения воронки и центробежного диска приведены на рис. 3.12. Коэффициенты вариации доз удобрений попавших в улавливатели были близки и составили для распределения при совпадающем направлении вращения (кривая 1) $-3,7\%$, а для распределения при встречном вращении (кривая 2) $-4,6\%$. При распределении смесей (рис. 3.13) частиц расслоение материала не наблюдалось. Коэффициент вариации общего распределения (кривая 1) составил $3,5\%$, а распределения частиц, размером более 3 мм (кривая 2) $-5,7\%$.

Распределение компонентов смеси по улавливателям

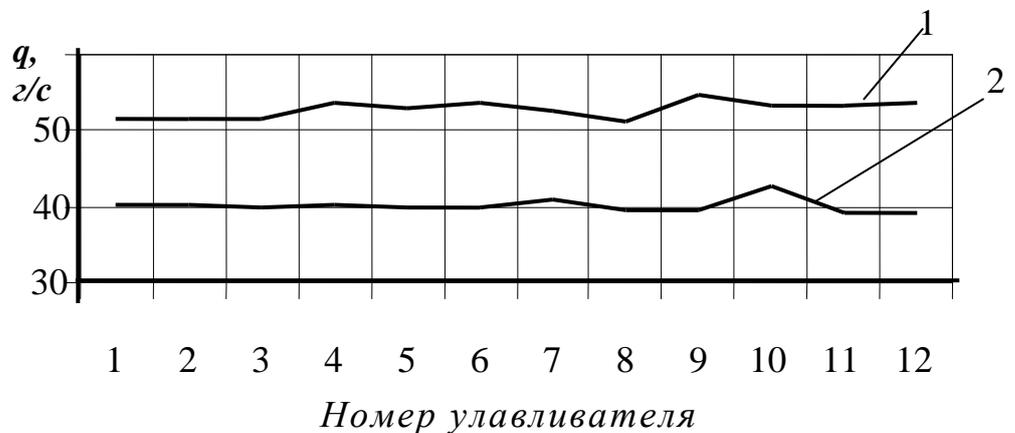


Рис. 3.12

Таким образом, применение данного рабочего органа позволят обеспечить качественное распределение по отсекам улавливателя минеральных удобрений и их смесей.

Использование разработанного рабочего органа позволяет на машинах для локального внесения удобрений применять центрально расположенный бункер. Это уменьшает число высевающих аппаратов, упрощает загрузку бункера, а также снижает нагрузку на консольные части навесных машин.

4. ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ И ДОЗИРОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ СПИРАЛЬНЫМ ШНЕКОМ

4.1 Общие положения и допущения

В результате анализа технологических процессов штанговых рабочих органов нами установлено, что наиболее приспособленными к высеву минеральных удобрений являются штанговые сеялки, оборудованные спиральным шнеком. По энергетическим показателям и материалоемкости предпочтительнее штанговые аппараты, работающие по тупиковой схеме.

Рассмотрим процессы транспортирования и дозирования минеральных удобрений штанговым рабочим органом, в котором перемещение материала от заборной части к высевающим отверстиям осуществляется с помощью спирального шнека.

Технологический процесс штанговых распределителей, работающих по тупиковой схеме, заключается в том, что материал, находящийся в кожухе шнека должен быть распределен по ширине захвата штанги равномерно и полностью. Избыток материала приводит к переполнению периферийной части кожуха удобрениями, что может привести к поломкам. Недостаток удобрений приводит к нарушению равномерности распределения частиц по полю, так как на периферии штанги удобрения будут отсутствовать.

По способу организации подачи материала возможны два варианта:

- подача материала из бункера через дозирующую систему в кожух спирального шнека;
- забор материала спиральным шнеком из бункера или кузова машины.

Нами рассматриваются процессы транспортирования и дозирования материала спирально-шнековым аппаратом, для случая забора минеральных удобрений из бункера спиральным шнеком.

Исследования выполнены при следующих допущениях:

1. Весь материал, поступивший в кожух шнека, распределяется по длине штанги. Переполнение штанги удобрениями не происходит. Это достигается тем, что высевное отверстие на периферии штанги выполняется с большой производительностью.
2. Транспортируемый материал состоит из частиц, размеры которых значительно меньше диаметра кожуха, шага спирали, что позволяет рассматривать минеральные удобрения как сплошную сыпучую среду.
3. Частицы материала подчиняются законам сухого трения. Силы сцепления между частицами не учитываются.
4. Зазор между кожухом и спиралью мал по сравнению с параметрами шнека, и им можно пренебречь.

5. За время транспортирования и дозирования физико-механические свойства минеральных удобрений не изменяются.

4.2 Транспортирование минеральных удобрений спиральным шнеком

При заборе минеральных удобрений спиральным шнеком из бункера объём транспортируемого материала зависит от условий заполнения межвиткового пространства. Объём материала, поступившего в кожух шнека, определится выражением

$$Q_k = A_k \cdot V_m \cdot \Psi_k, \quad (4.1)$$

где A_k – площадь поперечного сечения свободного пространства кожуха;

V_m – осевая скорость движения материала;

Ψ_k – коэффициент заполнения кожуха.

Площадь поперечного сечения свободного пространства кожуха определится из выражения

$$F_k = \frac{\pi \cdot D_{вн}^2}{4}, \quad (4.2)$$

где $D_{вн}$ – внутренний диаметр спирального шнека, равный $D_k - 2d_n$; d_{np} – диаметр проволоки спирали.

Осевая скорость движения материала зависит от коэффициента заполнения Ψ_k кожуха. При $\Psi_k \leq 0,5$ материал совершает в основном осевое движение. Тогда можно принять, что за один оборот спирали материал переместится на шаг S навивки. Скорость осевого движения будет равна

$$V_m = \frac{n \cdot S}{60} = \frac{S \cdot \omega}{2\pi}. \quad (4.3)$$

Подставив в (4.3) значения входящих величине из (2.1) и (2.2), получим

$$Q_k = \frac{S \cdot \omega \cdot D_{вн}^2}{8} \cdot \Psi_k. \quad (4.4)$$

На коэффициент заполнения Ψ_k влияют условия подачи материала в кожух. При заборе материала из бункера заполнение межвиткового пространства осуществляется за счет сил тяжести (гравитационный питатель).

Над спиралью шнека находится слой минеральных удобрений (рис. 4.1). Высота слоя в процессе работы изменяется от максимальной, равной глубине бункера, до минимальной, равной нулю. Определим максимально допустимую угловую скорость спирали, при которой обеспечиваются условия заполнения межвиткового пространства.

На глубине h от свободной поверхности выделим слой материала шириной S и высотой Δh (рис. 4.1 а). Рассмотрим равновесие этого элементарно малого объёма (рис. 4.1 б).

На выделенный элемент действуют:

– сила давления вышележащего слоя $F_g = \sigma_B \cdot b \cdot S$, направленная вниз;

- сила веса выделенного элемента $mg = \gamma \cdot \Delta h \cdot b \cdot S$, направленная вниз;
- центробежная сила инерции, действующая на часть выделенного объёма $F_y = m_1 \cdot \omega^2 \cdot \frac{D_{вн}}{2} \cdot \frac{d_{нр}}{S} = \gamma \cdot \Delta h \cdot \omega^2 \cdot b \cdot d_{нр} \cdot \frac{D_{вн}}{2}$, и направлена вверх;
- сила трения выделенного элемента о материал $T = 2\tau \Delta h(S+b)$.

К определению предельной угловой скорости спирали шнека

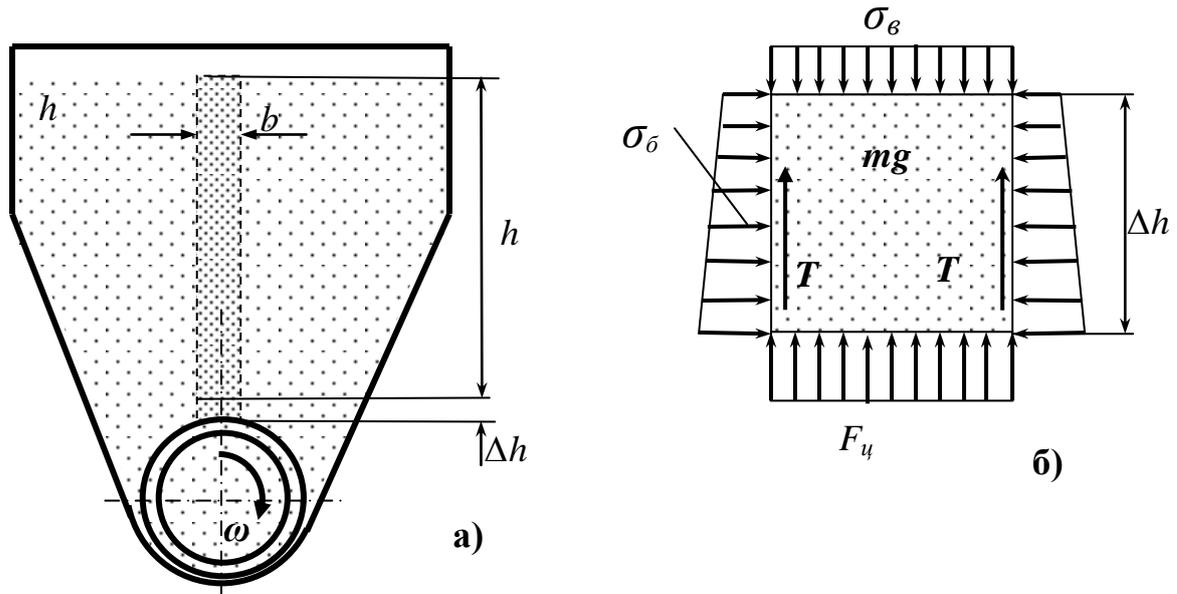


Рис. 4.1

Считая, в первом приближении, что давление вышележащего слоя подчиняется закону гидростатики, найдем силу давления F_σ .

$$F_\sigma = \gamma \cdot h \cdot b \cdot S. \quad (4.5)$$

Учитывая (4.5) и зависимость между нормальными σ_σ и касательными τ напряжениями, получим:

$$T = 2\sigma_\sigma f_1 \Delta h(S+b) = 2\gamma \cdot h \cdot f_1 \cdot \Delta h \cdot (b+S),$$

где f_1 - коэффициент внутреннего трения.

Дифференциальное уравнение движения выделенного элемента вдоль вертикальной оси бункера будет иметь вид

$$m \cdot x'' = \sum \bar{F}_k. \quad (4.6)$$

Подставив входящие величины в дифференциальное уравнение (4.6) движения, после преобразований получим

$$x'' = g \left(\frac{h}{\Delta h} + 1 - \frac{\omega^2 \cdot d_{нр} \cdot D_{вн}}{2S \cdot g} - \frac{2h \cdot f_1 \cdot (b+S)}{S \cdot b} \right). \quad (4.7)$$

Движение минеральных удобрений вниз возможно, если $x'' \geq 0$.

Определим максимальную угловую скорость вращения спирали, при которой она влияет на коэффициент заполнения кожуха материалом

$$\omega_{\max} \leq \sqrt{\frac{2g(1+h/\Delta h) \cdot b \cdot S - 4h \cdot g \cdot f_1(b+S)}{d_{np} \cdot D_{\text{вн}}^2}}. \quad (4.8)$$

Из полученного выражения следует, что на предельную угловую скорость ω_{\max} оказывают влияние высота h слоя удобрений над спиралью, ширина b загрузочного окна, шаг S навивки, наружный диаметр $D_{\text{вн}}$ спирали, диаметр d_{np} проволоки и коэффициент f_1 внутреннего трения. Угловая скорость ω_{\max} убывает с уменьшением высоты Δh деформируемого слоя материала.

Максимальное значение угловой скорости ω_{\max} найдем при $h/\Delta h = 1$.

$$\omega_{\max} \leq 2 \sqrt{g \frac{b \cdot S}{d_{np} \cdot D_{\text{вн}}^2}}. \quad (4.9)$$

При отношении $S/D_{\text{вн}}=1$, получим

$$\omega_{\max} = 2 \sqrt{b \cdot g / (d_{np} \cdot D_{\text{вн}})}. \quad (4.10)$$

Из выражения (4.10) следует, что для увеличения ω_{\max} необходимо увеличивать ширину b загрузочного отверстия. При заборе материала из бункера спиралью максимальное значение ширины загрузочного отверстия не превышает диаметр кожуха шнека, то есть $b=D_{\text{вн}}$ и тогда

$$\omega_{\min} = 2 \sqrt{g/d_{np}}. \quad (4.11)$$

Так для аппаратов с параметрами $D_{\text{вн}}=100$ мм и $d_{np}=5$ мм, получим $\omega_{\max}=28$ с⁻¹, то есть при угловой скорости более 28 с⁻¹ коэффициент заполнения кожуха материалом будет убывать.

Рассмотрим влияние высоты слоя материала на скорость ω_{\max} . Для аппарата при $b=D_{\text{вн}}$ и отношении шага спирали к её диаметру $S/D_{\text{вн}}=1$, получим

$$\omega_{\max} \leq \sqrt{\frac{2(1+h/\Delta h) \cdot D_{\text{вн}} - 8h \cdot f_1}{d_{np}}}. \quad (4.12)$$

На рисунке 4.2 приведены зависимости максимальной угловой скорости спирали шнека от высоты слоя удобрений. Анализ приведенных зависимостей показывает, что с увеличением высоты слоя удобрений над спиралью значение ω_{\max} возрастает для всех видов минеральных удобрений. Так, при высоте слоя удобрений $h=0,5$ м, для минеральных удобрений с коэффициентом внутреннего трения $f_1=0,2$ минимальная угловая скорость спирали составила $\omega_{\max}=41,5$ с⁻¹, а для удобрений с коэффициентом внутреннего трения $f_1=0,5$ она составила $\omega_{\max}=40,5$ с⁻¹. Различие составило менее 3%.

Наименьшее значение ω_{\max} для всех видов минеральных удобрений составило 8,9 с⁻¹ при минимальной высоте слоя над спиралью.

Следовательно, при проектировании спирально-шнекового аппарата необходимо учитывать влияние угловой скорости спирали на коэффициент заполнения кожуха минеральными удобрениями.

**Влияние высоты слоя удобрений
на угловую скорость ω_{max}**

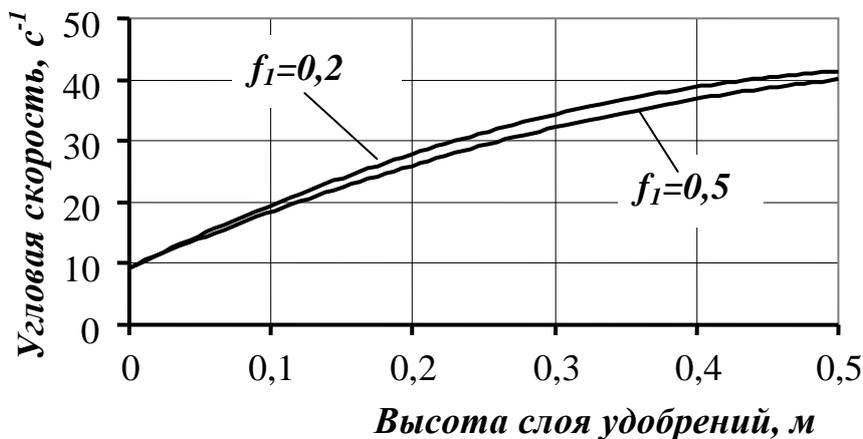


Рис. 4.2

Снижение влияния угловой скорости на коэффициент заполнения кожуха может быть достигнуто увеличением длины заборной части спирали. Длина заборной части спирального или винтового шнека должна составлять не менее 2...3 шагов навивки. При заборе материала спиралью из бункера машины длина заборной части спирали составляет 5...8 шагов навивки, что позволяет значительно снизить влияние угловой скорости на заполнение кожуха материалом.

Другой способ снижения отрицательного влияния угловой скорости вращения спирали на степень заполнения кожуха минеральными удобрениями реализован нами в техническом решении по патенту РФ №2233064.

В данном техническом решении (рис. 4.3) в бункере 1 над заборными частями спирального шнека 2 установлена планка 3, на которой под разными углами к оси спирального шнека расположены стержни 4. Планка 3 посредством жестко связанного с ней рычага 5 находится в зацеплении с наклонно установленной на валу шайбой 6.

При вращении приводного вала спирального шнека рычаг 5 совершает колебательные движения с частотой, равной частоте вращения вала. Стержни 4 воздействуя на материал, разрушают своды и одновременно создают давление на слой удобрений, находящийся над спиралью.

Спирально-шнековый высеваящий аппарат с побудителем и сводоразрушающим устройством

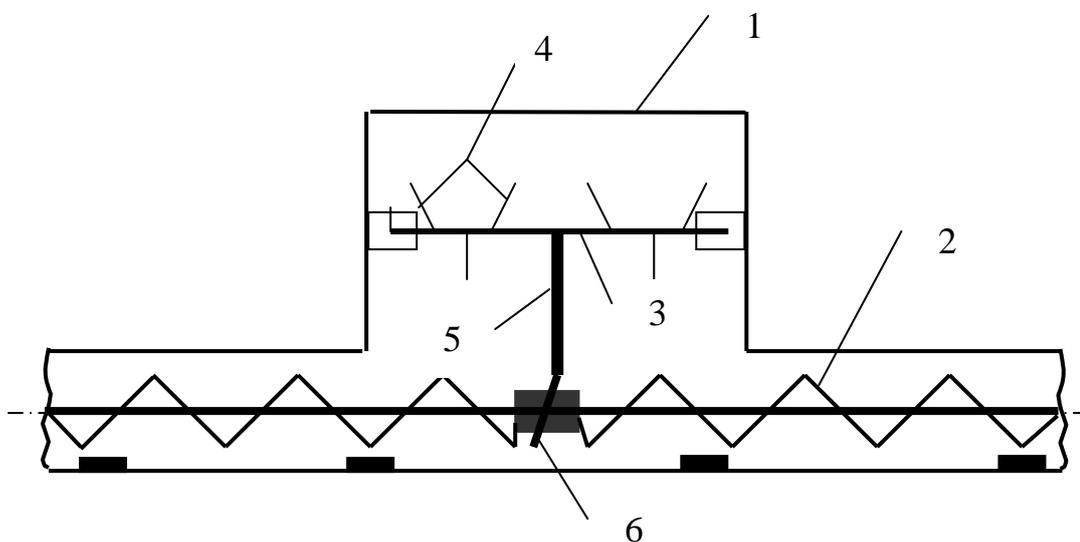


Рис. 4.3

4.3. Истечение минеральных удобрений из высевных отверстий

В ряде конструкций шнековых и спирально-шнековых распределителей минеральных удобрений дозирующие отверстия расположены в нижней части кожуха (рис. 4.4).

Спирально-шнековый аппарат

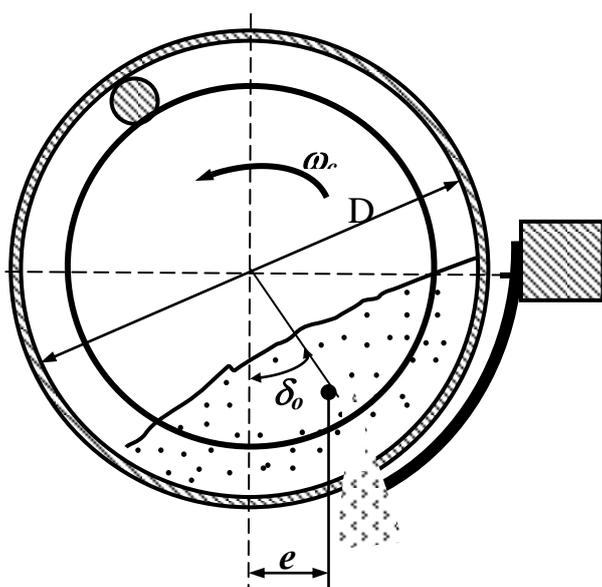


Рис. 4.4

Рассмотрим влияние высоты слоя минеральных удобрений в кожухе шнека на производительность дозирующих (высевных) отверстий.

Учитывая, что в спирально-шнековом аппарате истечение удобрений через высевное отверстие близко к гравитационному истечению, то объёмный расход дозатора можно определить по формуле

$$q_{max} = A_{отв} V_u, \quad (4.13)$$

где $A_{отв}$ – площадь высевного отверстия; V_u – средняя по сечению потока скорость истечения материала.

Неопределенной в данном выражении является скорость V_u истечения.

Решая задачу по определению скорости V_u истечения С.И. Назаров, рассматривая движения части столба, расположенного над отверстием, получил зависимость скорости истечения от размеров и формы отверстия, вида удобрений и высоты столба. Для несвязных сыпучих материалов скорость истечения

$$V_u = \sqrt{\frac{2g\sigma_\delta}{\gamma}}$$

и производительность отверстия $q = \mu \cdot A_{отв} \sqrt{\frac{2g\sigma_\delta}{\gamma}}$, (4.14)

где μ - коэффициент расхода, определяемый опытным путем; σ_δ - вертикальное давление столба удобрений.

С.И. Назаров отмечает, что входящее в (4.14) вертикальное давление нельзя рассматривать только как давление столба удобрений, так как кроме нормальных напряжений σ_δ , в площадках действуют напряжения сдвига – τ .

Кроме того, необходимо учитывать, что зависимости (4.14) полученные для случая истечения материала из глубоких бункеров. Поэтому она не приспособлена к оценке производительности высевных отверстий. Это обусловлено тем, что высота слоя материала над высевными отверстиями значительно меньше высоты столба удобрений в бункерах.

Особенностью процесса истечения материала из дозирующих отверстий спирально-шнековых аппаратов является то, что помимо вертикального движения материал перемещается вдоль оси шнека со скоростью V_m и испытывает воздействие со стороны рабочих органов машины. Высота слоя удобрений, расположенных над высевным отверстием значительно меньше высоты слоя удобрений в бункерах, что накладывает определенные ограничения на применение известных зависимостей.

При воздействии вертикальных сил и осевого движения материала на элементарный объём будут действовать следующие силы (рис. 4.5):

- сила веса $\gamma dh A_{отв}$ выделенного элемента, направленная вниз;
- сила давления на верхнюю поверхность выделенного элемента, равная $\sigma_\delta A_{отв}$;
- сила давления на нижнюю поверхность выделенного элемента, равная $(\sigma_\delta + d\sigma_\delta) A_{отв}$;
- сила бокового давления. Нормальные напряжения изменяющиеся по высоте выделенного элемента от σ_δ до $(\sigma_\delta + d\sigma_\delta)$. Ввиду малости высоты dh элемент принимаем напряжения σ_δ распределенными по высоте dh равномерно. Тогда сила бокового давления будет равна $\sigma_\delta \cdot dh \cdot 2\pi r_{отв}$;
- сила трения на боковой поверхности выделенного элемента, равная $dT = \tau dh \cdot 2\pi r_{отв}$.

Учитывая зависимость между нормальными σ_δ и касательными τ напряжениями, получим: $dT = \sigma_\delta f_1 dh \pi r_{отв}$;

Из механики сыпучих сред известно, что для сыпучих (несвязных) материалов напряжения σ_{δ} связаны с высотой h слоя и коэффициентом подвижности m_I удобрений выражением:

$$\sigma_{\delta} = \gamma m_I h_{\kappa} \quad (4.15)$$

Касательные напряжения, действующие по боковой грани выделенного элемента

$$\tau = \sigma_{\delta} f_I n, \quad (4.16)$$

где n – коэффициент бокового давления, определяемый для основных видов минеральных удобрений по формуле: $n = a + bW$, в которой a, b – опытные коэффициенты; W – относительная влажность; f_I – коэффициент внутреннего трения частиц.

Дифференциальное уравнение движения выделенного элемента вдоль вертикальной оси имеет вид:

$$m y'' = \sum F_y. \quad (4.17)$$

При установившемся режиме истечения $a_y = y'' = 0$, и тогда $\sum F_y = 0$.

Приращение силы $d\sigma_{\delta}$ $A_{омв}$ давления на нижнее основание выделенно-

К анализу процесса истечения удобрений через высевное отверстие

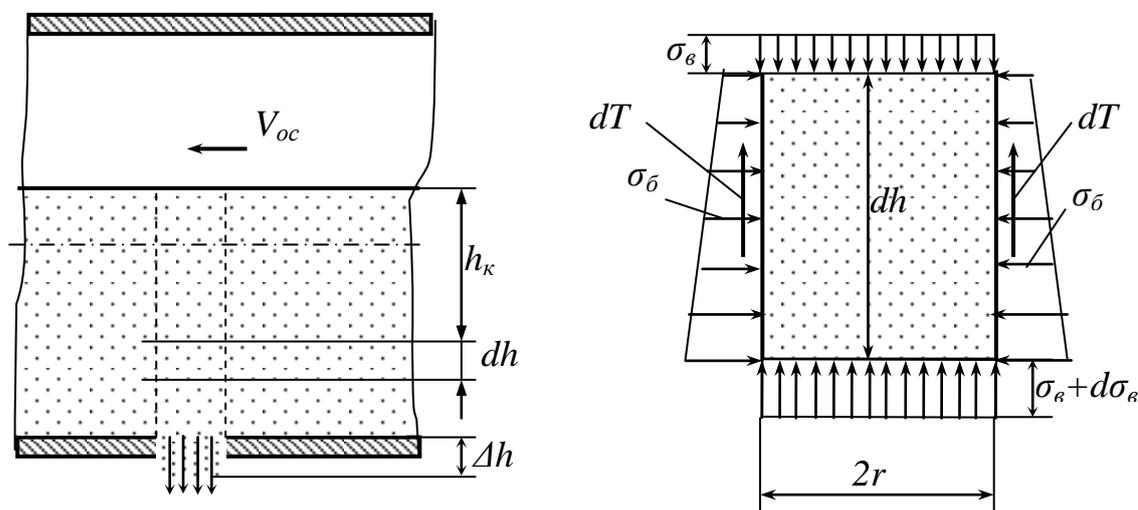


Рис. 4.5

го элемента воспринимает силу веса $\gamma dh A_{омв}$ и силу трения $dT = \tau dh 2\pi r_{омв}$, то есть

$$d\sigma_{\delta} A_{омв} = \gamma dh A_{омв} - \tau dh 2\pi r_{омв}$$

Учитывая (4.8) и (4.10) и выполнив преобразования, получим:

$$d\sigma_{\epsilon} = \gamma \cdot dh - \frac{\gamma \cdot f_1 \cdot m_1 \cdot n}{R_2} h \cdot dh, \quad (4.18)$$

где $R_2 = A_{омв}/(2\pi r_{омв})$ – гидравлический радиус.

Взяв интеграл от обеих частей уравнения (4.18), определим постоянную C интегрирования.

Учитывая, что при $h=0$ в общем случае $\sigma_{\epsilon}=0$, получим:

$$\sigma_{\epsilon} = \gamma \cdot h_{\kappa} \left(1 - \frac{f_1 m_1 n}{2R_2} h_{\kappa} \right). \quad (4.19)$$

Подставив значение напряжения из (4.19) в формулу(4.14) и выполнив преобразования, получим выражение для определения производительности дозирующего отверстия:

$$q = \mu \cdot A_{омв} \sqrt{2gh_{\kappa} \left(1 - \frac{f_1 m_1 n}{2R_2} h_{\kappa} \right)}. \quad (4.20)$$

Анализ зависимости (4.20) показывает, что на производительность дозирующих отверстий оказывает влияние высота h_{κ} слоя удобрений, физико-механические свойства материала, форма и площадь дозирующего отверстия, коэффициент μ истечения.

Значения коэффициентов μ истечения для различных видов минеральных удобрений и форм высевных отверстий необходимо определить экспериментально. Это обусловлено тем, что в расчетных зависимостях не учтены силы взаимодействия частиц между собой и со стенками дозирующих отверстий.

На рисунке 4.6 приведены графики зависимости производительности дозирующих отверстий от высоты слоя удобрений над ними. Данные зависи-

мости построены при коэффициенте $\mu=1$.

Влияние на производительность q дозирующих отверстий высоты h_{κ} слоя удобрений (рисунок 4.6) является одной из основных причин снижения равномерности распределения материала по ширине рассева или по длине штанги.

Анализ рисунка 4.6 позволяет заключить, что с увеличением высоты слоя удобрений производительность дозирующих отвер-

**График зависимости
производительности q высевных отверстий
от высоты слоя удобрений**

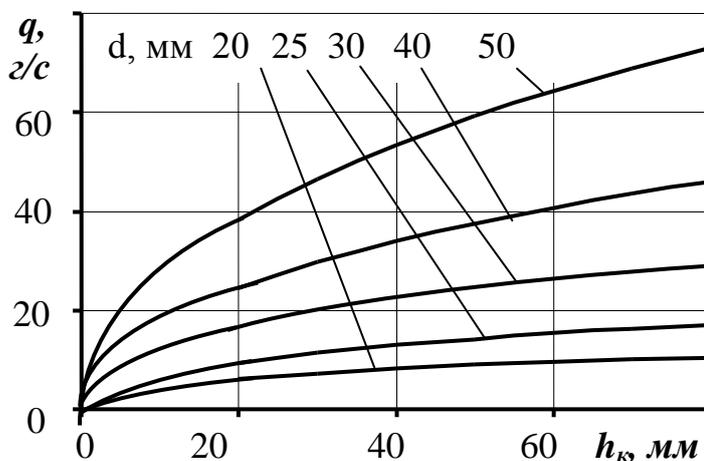


Рис. 4.6

стей возрастает. Так, с увеличением h до $h \leq 55$ мм при диаметре дозирующего отверстия $d=20$ мм его производительность возрастает, а затем, при $h > 55$ мм остается практически постоянной. Аналогично изменяется производительность и при других диаметрах дозирующих отверстий.

Учитывая, что высота слоя удобрений над дозирующим отверстием h_k связана с углом δ_c и коэффициентом заполнения ψ_i выражениями (4.14)...(4.16), то после преобразований получим закон изменения площади дозирующих отверстий

$$A_{отв}^{(i)} = \frac{q_i}{\mu \sqrt{gD(1 - \cos \delta_c) \cdot \left(1 - \frac{f_1 m_1 n}{2R_2} \left(\frac{D}{2} (1 - \cos \delta_c) \right) \right)}}. \quad (4.21)$$

Из зависимости (4.21) следует, что площадь дозирующего отверстия зависит от центрального угла δ_c , угла внутреннего трения, параметров аппарата и требуемой нормы высева.

При работе спирально-шнекового аппарата высота слоя удобрений над высеваемыми отверстиями будет изменяться от h_{max} до h_{min} . Так как центральный угол δ_c связан с высотой слоя выражением (4.15), то по длине штанги он будет изменяться от наибольшего значения в подающей части до минимального – в на периферии.

На рисунке 4.7 приведены зависимости площади дозирующих отверстий по длине штанги (от величины центрального угла δ_c) при разных нормах высева.

Зависимость площади высевного отверстия от величины центрального угла

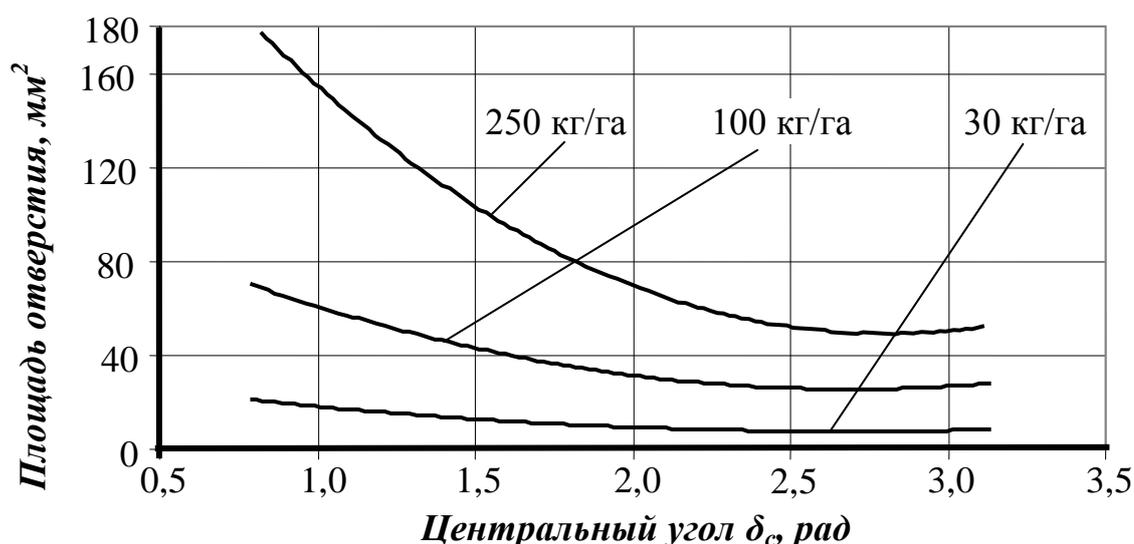


Рис. 4.7

Из рисунка 4.7 следует, что при расположении дозирующих отверстий в нижней части кожуха шнека площадь проходного сечения дозирующих отверстий должна увеличиваться от подающей части кожуха к его периферии.

Кроме того, с изменением нормы высева проходным сечением дозирующих отверстий необходимо управлять.

Влиянием коэффициента внутреннего трения (видом минеральных удобрений) на площадь дозирующих отверстий можно пренебречь (рис. 4.8).

**Зависимость площади отверстия от
коэффициента внутреннего трения**

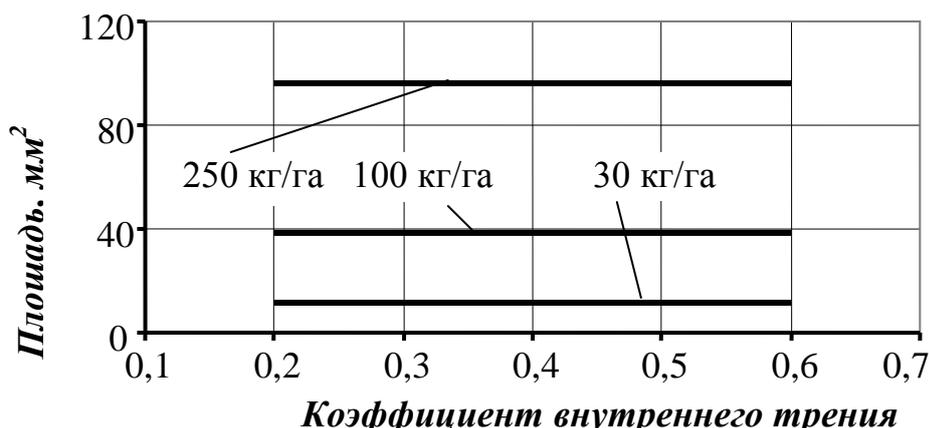


Рис. 4.8

Другим недостатком нижнего расположения дозирующих отверстий является то, что при высеве минеральных удобрений повышенной влажности необходимо учитывать возможность налипания частиц на стенки дозирующих отверстий. Отклонение действительной производительности дозирующих отверстий от расчетной приводит к повышению неравномерности дозирования.

Для устранения отмеченных выше недостатков нами предложен ряд технических решений, в которых дозирующие отверстия располагаются под свободной поверхностью сыпучего тела, движущегося в кожухе спирального шнека (рис. 4.9).

Определим абсолютную скорость истечения минеральных удобрений из дозирующих отверстий, рассматривая это движение как сложное.

Относительная скорость истечения материала складывается из окружной скорости спирали $V_{ок}$ и осевой скорости $V_{ос}$ движения материала.

Из теории шнековых транспортеров следует, что при коэффициентах заполнения $\psi_k < 0,5$ осевое перемещение материала за один оборот шнека в первом приближении равно шагу S_c навивки. Тогда скорость $V_{ос}$ осевого движения сыпучего тела будет равна

$$V_{ос} = \frac{n}{60} S_c = \frac{S_c \cdot \omega_c}{2 \cdot \pi}, \quad (4.22)$$

где n – частота вращения спирали, 1/мин.

**Спирально-шнековый аппарат
с дозирующими отверстиями, расположенными
под свободной поверхностью сыпучего тела**

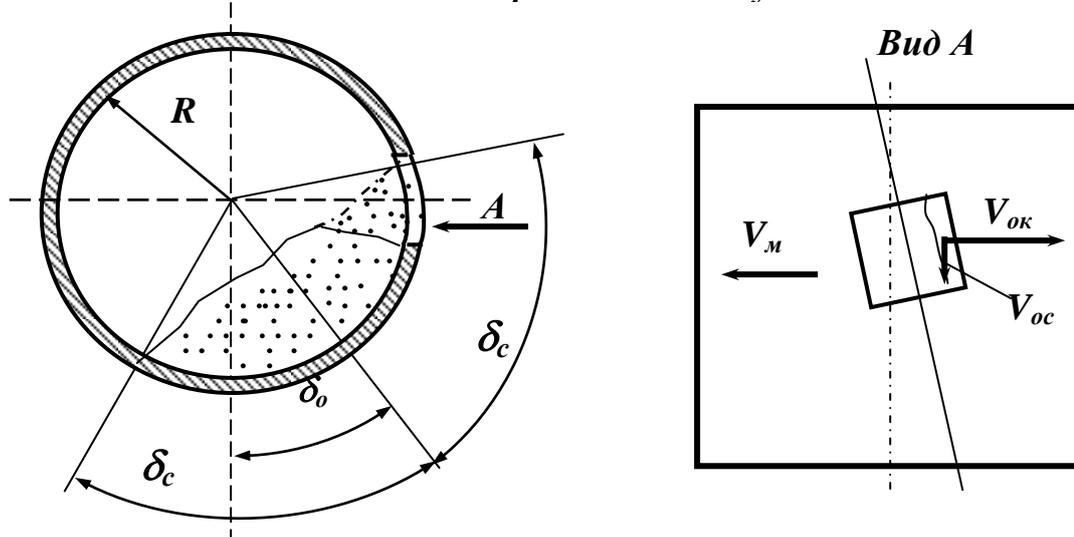


Рис. 4.9

Окружную скорость частиц, расположенных на удалении R от оси вращения спирали, принимаем равной окружной скорости спирали

$$V_{ок} = \omega_c R.$$

Учитывая, что векторы осевой $V_{ос}$ и окружной $V_{ок}$ скоростей взаимно перпендикулярны, получим

$$V_{ис} = \sqrt{V_{ос}^2 + V_{ок}^2} = \omega_c \cdot R \sqrt{1 + \frac{S_c^2}{4\pi^2 \cdot R^2}}. \quad (4.23)$$

Анализ зависимости (4.23) показывает, что при шаге навивки S_c равном диаметру $D=2R$ второе слагаемое под корнем равно $1/\pi^2 \approx 0,1$. Тогда с ошибкой не более 5% можно считать, что

$$V_{ис} = \omega_c R.$$

Абсолютную скорость частиц найдем по теореме сложения скоростей

$$\bar{V}_a = \bar{V}_m + \bar{V}_{ис}, \quad (4.24)$$

где V_m – поступательная скорость движения агрегата.

Модуль абсолютной скорости определим по теореме косинусов. После подстановки соответствующих значений и преобразований получим

$$V_a = 1,41\omega_c R \sqrt{\left(1 + \frac{S_c^2}{8\pi^2 R^2}\right) + \left(1 + \frac{S_c^2}{4\pi^2 R^2}\right)^{1/2} \cos\alpha}, \quad (4.25)$$

где α – угол между векторами скоростей $V_{ис}$ и V_m .

Для дозирующих отверстий, расположенных в нижней части кожуха шнека с учетом зависимости (4.24) модуль абсолютной скорости частиц в момент истечения определится по формуле:

$$V_a = V_m \pm \omega_c R. \quad (4.26)$$

На выбор знака в формуле (2.26) оказывает влияние направление вектора окружной скорости, то есть направление вращения спирали. Знак плюс необходимо ставить, если направление векторов окружной скорости и скорости машины совпадают.

2.4. Распределение минеральных удобрений по поверхности поля

Основным показателем качества работы машин для внесения минеральных удобрений является равномерность дозирования и распределения частиц по ширине захвата и по ходу движения агрегата. При работе спирального шнека вынос минеральных удобрений через дозирующие отверстия осуществляют витки спирали. Так как витки спирали расположены с определенным шагом, то поток частиц является пульсирующим. Число пульсаций, приходящихся на 1 погонный метр поля, зависит от угловой скорости спирали, шага навивки и скорости движения машины. Следовательно, качество распределения частиц по ходу движения машины будет зависеть от числа пульсаций и высоты расположения дозирующих отверстий от поверхности поля. Равномерность распределения частиц по ширине захвата машины зависит от высоты расположения штанги, длины дозирующих отверстий и расстояния между ними.

Для описания процесса распределения частиц по поверхности поля воспользуемся теоретическими положениями, разработанными доктором технических наук профессором В.А. Черноволым.

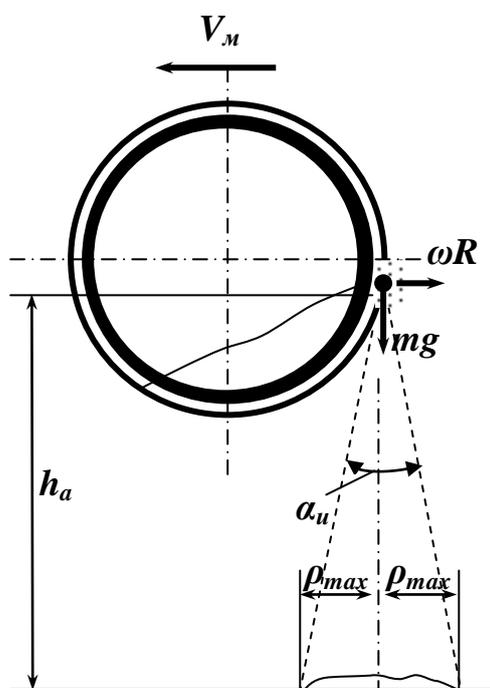


Рис. 4.10

В процессе движения машины по полю частицы минеральных удобрений выносятся из штанги со скоростью V_a и засевают полосу шириной $2\rho_{max}$ (рисунок 4.10). Как отмечалось выше, ширина полосы рассева и распределение частиц по ней зависят от ширины дозирующего отверстия, угла рассева α_u и высоты h_a расположения штанги над поверхностью поля.

При работе машины на стационаре распределение частиц по поверхности поля имеет вид кольца (рис. 4.11), параметры которого зависят от высоты расположения штанги и параметров дозирующего отверстия. Доза выпавших удобрений на удалении x от оси симметрии зоны распределения равна

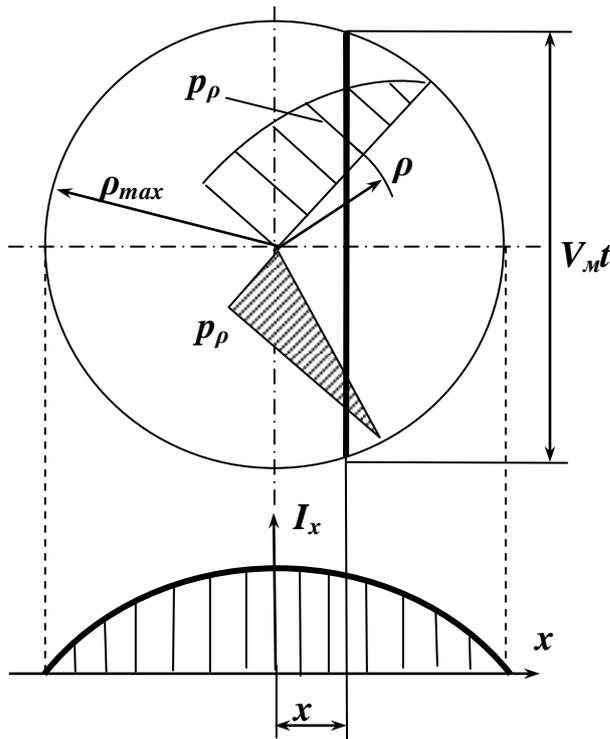


Рис. 4.11

Функцию плотности распределения частиц по радиусам зоны рассева найдем по формуле

$$p(\rho) = q_\rho / A_\rho, \quad (4.29)$$

где A_ρ – площадь под параболой, заключенной в интервале от $\rho=0$ до $\rho=\rho_{max}$.

$$A_\rho = \int_0^{\rho_{max}} a(\rho_{max}^2 - \rho^2) d\rho = \frac{2}{3} a \cdot \rho_{max}^3 \quad (4.30)$$

Подставив в (4.29) значения входящих величин после преобразований получим

$$p(\rho) = \frac{3(\rho_{max}^2 - \rho^2)}{2\rho_{max}^3}. \quad (4.31)$$

Тогда, доза удобрений, высеянная на удалении x от оси симметрии зоны, определится по формуле:

$$q_x = \int_{t=0}^t \frac{Q_c}{\rho} \frac{3(\rho_{max}^2 - \rho^2)}{2\rho_{max}^3} dt. \quad (4.32)$$

Решение уравнения (4.32) можно выполнить одним из численных методов.

На рисунке 4.12 приведены графики распределения частиц минеральных удобрений по ширине засеваемой полосы, при распределении частиц по радиусам, удовлетворяющим условию (4.28).

Кривые распределения имеют куполообразный вид. Кривая 1 соответствует значению $\rho_{max}=12$ см, кривая 2 – $\rho_{max}=15$ см, а кривая 3 – $\rho_{max}=18$ см.

$$q_x = \int_{t=0}^t \frac{Q_c}{\rho} p(\rho) dt, \quad (4.27)$$

где t – время выпадения удобрений, равное

$$t = \frac{2\sqrt{\rho_{max}^2 - x^2}}{V_m};$$

V_m – скорость движения машины; $p(\rho)$ – функция плотности распределения частиц вдоль радиуса ρ .

Пусть распределение частиц по радиусам зоны рассева описывается уравнением линии второго порядка, удовлетворяющее условиям: $q = 0$ при $\rho = \pm \rho_{max}$.

Данным условиям удовлетворяет уравнение параболы, вида:

$$q_\rho = a(\rho_{max}^2 - \rho^2). \quad (4.28)$$

Анализ кривых распределения (рис. 4.12) позволяет заключить, что с увеличением радиуса зоны рассева равномерность распределения частиц возрастает, но не удовлетворяет требованиям агротехники.

**Распределение частиц минеральных удобрений
по ширине полосы рассева**

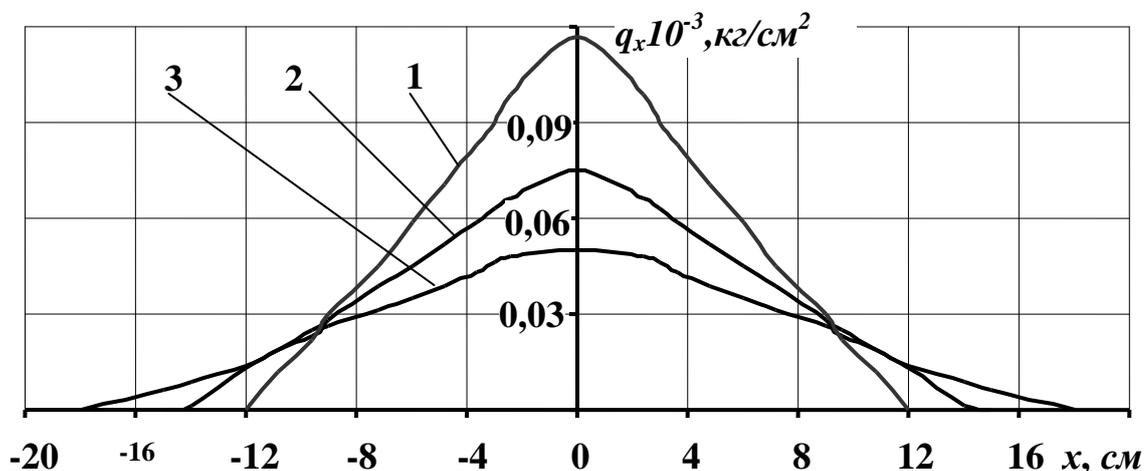


Рис. 4.12

Так неравномерность распределения частиц по ширине полосы рассева при $\rho_{max}=18\text{см}$ (рис. 4.12, кривая 3) составила 72%, а при $\rho_{max}=12\text{см}$ (рис.4.12, кривая 1) – 76%. Превышение агротехнически допустимой неравномерности составило 2,8 – 4,7 раза.

Если распределение частиц по радиусам зоны рассева описывается уравнением линии первого порядка, то выражение (4.28) будет иметь вид

$$q_{\rho} = q_{max} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{max}}\right). \quad (4.33)$$

Выполнив аналогичные (4.29) и (4.30) преобразования, выражение (4.31) будет иметь вид

$$p(\rho) = \frac{2(\rho_{max} - \rho)}{\rho_{max}^2}. \quad (4.34)$$

Тогда доза удобрений, высеянная на удалении x от оси симметрии зоны, определится по формуле

$$q_x = \int_{t=0}^t \frac{Q_c}{\rho} \frac{2(\rho_{max} - \rho)}{\rho_{max}^2} dt. \quad (4.35)$$

Оценка равномерности распределения минеральных удобрений по поверхности поля в зависимости от расстояний между дозирующими отверстиями выполнялась по коэффициенту вариации

$$V_s = 100 \frac{\sigma_x}{\bar{q}_x}, \quad (4.36)$$

где \bar{q}_x – среднее значение доз, попавших в улавливатель; σ_x – среднее квадратическое отклонение доз, равное

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (q_i - \bar{q}_x)^2}{n - 1}}, \quad (4.37)$$

где q_i – текущее значение доз; n – число оцениваемых доз.

Зависимости (4.35...4.37) неравномерности распределения минеральных удобрений по поверхности поля от расстояния между дозирующими отверстиями позволяют заключить, что расстояние между дозирующими отверстиями оказывает значительное влияние на качество распределения частиц по полю. Так, при расстоянии между дозирующими отверстиями, равном 36 см неравномерность рассева составила 72%. Агротехническая норма распределения достигается при расстоянии между дозирующими отверстиями менее $b_{min} = 18$ см.

Учитывая, что ширина зоны рассева связана с размерами дозирующих отверстий и высоты расположения штанги над поверхностью поля, то для обоснования расстояния между дозирующими отверстиями необходимо иметь экспериментальные данные по распределению доз по ширине рассева в зависимости от высоты расположения штанги.

4.5. Управление процессом высева минеральных удобрений

Результаты наших исследований и данные литературных источников указывают на то, что при высеве минеральных удобрений спирально-шнековым аппаратом на равномерность дозирования оказывают влияние вид вносимых удобрений, частота вращения спирали, норма высева.

Для обеспечения агротехнических требований по равномерности распределения частиц по поверхности поля положение дозирующих отверстий

Функциональная схема устройства управления

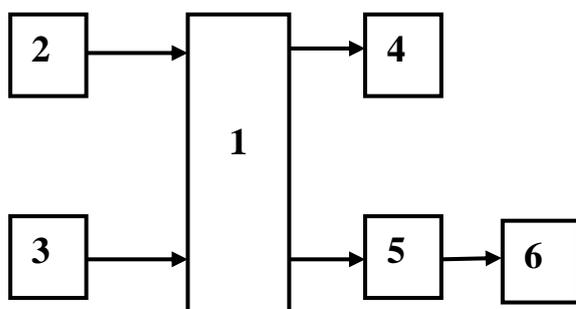


Рис. 4. 14

по длине штанги необходимо регулировать. У штангового высевающего аппарата шнекового типа в процессе эксплуатации необходимо изменять угол наклона линии, проходящей через нижние обрезы дозирующих отверстий.

Если в пределах поля норма и вид вносимых удобрений не изменяются, то регулирование положения дозирующих отверстий можно осуществлять при настройке машины на норму высева и равномерность дозирования. В технологиях координатно-

го земледелия в процессе работы нормой высева и видом вносимых удобрений необходимо управлять в зависимости от потребности почв в питательных элементах.

Для управления равномерность дозирования минеральных удобрений в процессе движения машины по полю нами разработано устройство управления процессом высева, функциональная схема которого приведена на рисунке 4.14. Устройство содержит блок управления 1, датчики высева 2 и 3, блок индикации 4, схему управления 5 и исполнительный механизм 6. Взаимное расположение датчиков 2 и 3 и исполнительного механизма 6 представлено на рисунке 4.15.

Расположение датчиков и исполнительного механизма системы управления процессом высева

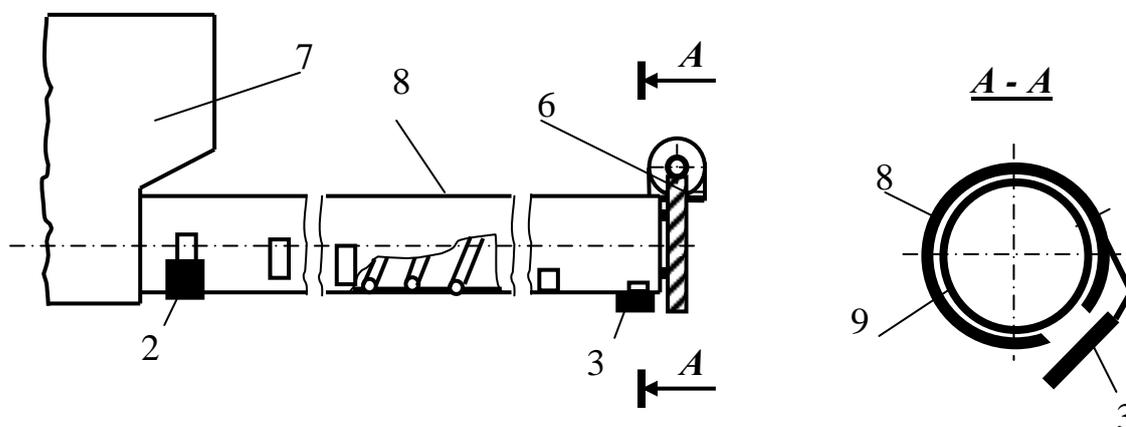


Рис. 4. 15

Устройство управления процессом высева минеральных удобрений штанговым спиральным распределителем минеральных удобрений содержит бункер 7, внутри которого расположен спиральный шнек 9. Шнек 9 забирает минеральные удобрения из бункера 7 и транспортирует их в кожухе 8. Высев материала осуществляется через дозирующие отверстия. Под первым дозирующим отверстием расположен датчик высева 2, а под последним – датчик 3. Датчики 2 и 3 подключены к входам блока управления 1. Периферийная часть кожуха 8 закреплена на раме машины с возможностью поворота. Поворот кожуха 8 осуществляется исполнительным механизмом 6. Он включает червячный редуктор и шаговый электродвигатель. Колесо червячного редуктора связано с кожухом 8, а электродвигатель и редуктор закреплены на раме машины.

Блок индикации 4 содержит два светодиода, один из которых оповещает о включении системы управления, а другой о нарушении равномерности дозирования удобрений. Блоком управления 1 является микроЭВМ, выполненная на базе микросхемы К 18 16 ВЕ 48, аналого-цифрового преобразователя К 572 ПВ3 и микросхемы вывода К 580 ВА86.

Блок-схема алгоритма функционирования системы управления процессом дозирования минеральных удобрений спирально – шнековым аппаратом при расположении нижнего обреза дозирующих отверстий ниже свободной поверхности сыпучего тела представлена на рисунке 4.16.

При внесении минеральных удобрений сигнал от датчика 2 поступает в аналого-цифровой преобразователь и в первую ячейку блока памяти записывается сигнал в цифровой форме q_1 . Сигнал от датчика 3 в цифровой форме q_2 записывается во вторую ячейку блока памяти.

Далее производится расчет разности $\Delta q = (q_1 - q_2)$, которая сравнивается с допусковым отклонением $[\varepsilon]$.

Если $\Delta q \leq [\varepsilon]$, то система производит повторный опрос датчиков 2 и 3. Опрос выполняется до тех пор, пока разность Δq не превысит $[\varepsilon]$. При $\Delta q > [\varepsilon]$ производится повторный опрос датчиков. Если при повторном опросе $\Delta q > [\varepsilon]$, то определяется знак этой разности.

Если разность положительная, то блок управления 1 формирует сигнал на включение исполнительного механизма на поворот кожуха по направлению хода часовой стрелки и одновременно на блоке индикации появляется сигнал о нарушении условий высева.

Происходит дальнейший опрос датчиков 2 и 3 и после выполнения условия $\Delta q \leq [\varepsilon]$ блок управления формирует сигнал на отключение исполнительного механизма.

Если разность сигналов $\Delta q = (q_1 - q_2)$ отрицательная, то блок управления после повторного опроса формирует сигнал на включение исполнительного механизма для осуществления поворота кожуха против направления хода часовой стрелки.

При достижении условия $\Delta q \leq [\varepsilon]$ при первом и повторном опросах блок управления формирует сигнал на отключение привода исполнительного механизма.

Для управления процессом дозирования минеральных удобрений при неисправной САУ в конструкции исполнительного механизма предусмотрен ручной привод червячного редуктора (привод вала червяка).

Настройка машины на равномерность дозирования в этом случае осуществляется по разности доз высеянных за контрольный промежуток времени в первом и последнем дозирующих отверстиях.

Учитывая, что распределение доз по длине штанги изменяется плавно от максимального значения q_{max} до минимального q_{min} и может быть описано линией первого порядка, то оценку равномерности дозирования можно определить по размаху варьироваемого признака.

Для нашего случая неравномерность дозирования определяется по формуле

$$H_R = \frac{q_{max} - q_{min}}{(q_{max} + q_{min})} 100, \quad \% \quad (4.38)$$

Блок-схема алгоритма функционирования системы управления

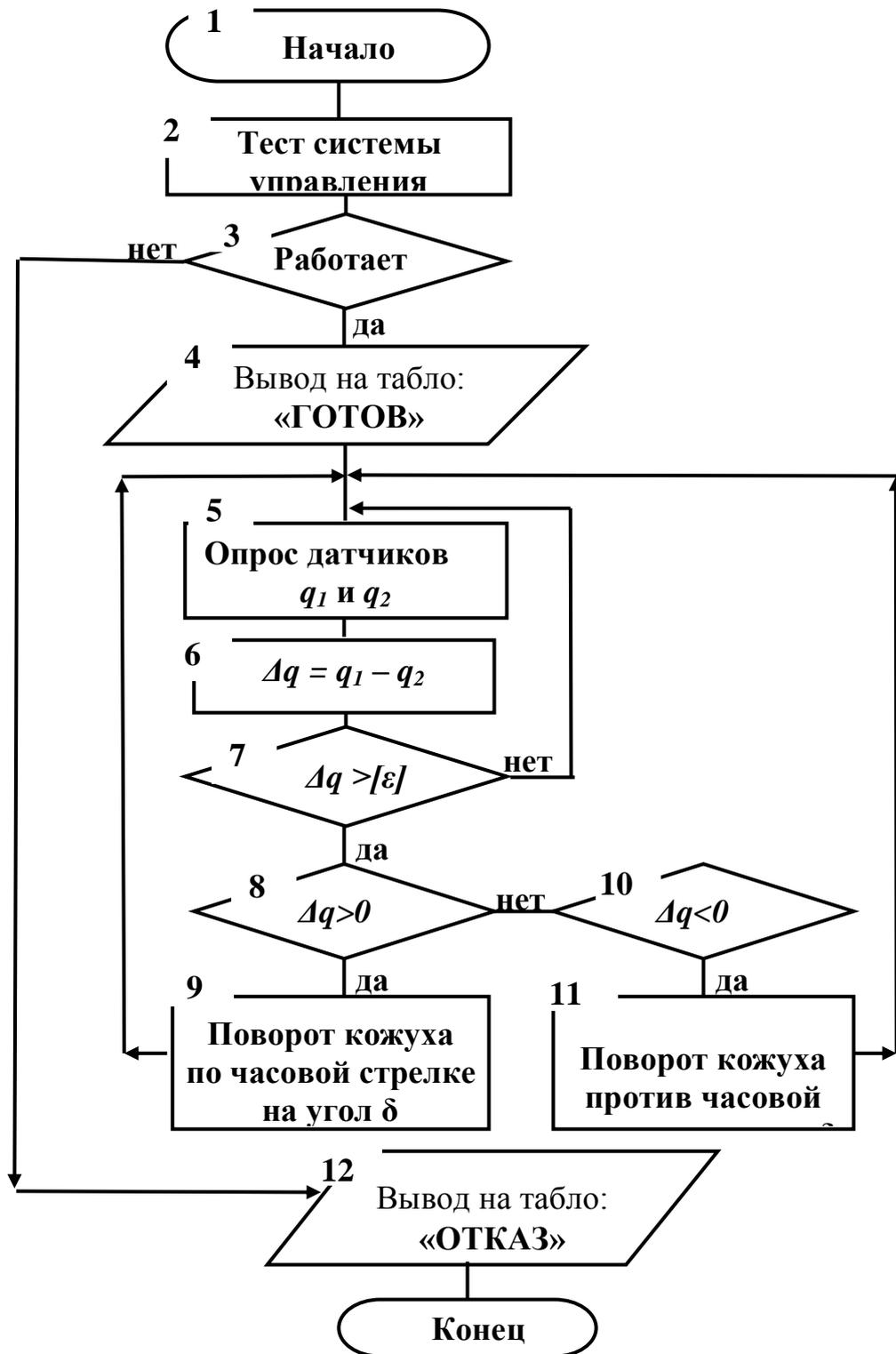


Рис. 4.16

Показатель H_R может быть использован как допускаемая ошибка управления, то есть

$$[\varepsilon] = H_R = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{(q_{\max} + q_{\min})} 100, \% \quad (4.39)$$

При разработке автоматизированных систем управления процессом внесения минеральных удобрений необходимо иметь передаточные функции объекта управления – спирального туковысевающего аппарата.

Результаты исследований, выполненные в АЧГАА, позволяют заключить, что спиральный туковысевающий аппарат в системах автоматизированного управления может быть представлен как апериодическое звено первого порядка с запаздыванием

$$W_p = \frac{k_{об} \cdot e^{-p \cdot \tau_{об}}}{T_a p + 1}, \quad (4.40)$$

где $k_{об}$ – коэффициент усиления объекта; $\tau_{об}$ – время запаздывания; T_a – время разгона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований, представленные в данной работе могут быть использованы специалистами при разработке систем идентификации почвенного плодородия и при разработке средств механизации и автоматизации процессов внесения минеральных удобрений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Н.С. Влияние величины отбираемой пробы на точность определения показателя неравномерности распределения туков. //В кн.: Механизация и электрификация сельского хозяйства. –1979. –Вып. 46. – С. 42...46.
2. Баранов Н.П. Развитие производства и повышение эффективности использования минеральных удобрений: Автореферат диссертации на соискание ученой степени докт. экон. наук./Н.П. Баранов. -М. – 1970. –39с.
3. Баранов П.А. Тукосмешивание - необходимое звено химизации сельского хозяйства. /П.А. Баранов // Химия в сельском хозяйстве – 1971.- №11. –С. 23-26
4. Безруков Н.П. Использование разбрасывателя РУМ-3 для одновременного смешивания и внесения двух видов минеральных удобрений /Н.П. Безруков, Н.В. Обыденкин - В кн.: Механизация процессов применения удобрений в сельском хозяйстве. /Тезисы НТС. – Минск – 1971. - С. 137...138.
5. Блажинский Г. Внесение сыпучих минеральных удобрений штанговыми распределителями с гибким шнеком /Г. Блажинский. -Автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук –Горки. -1984.-20 с.
6. Богомягких В.А. Теория и расчет бункеров для зернистых материалов /В.А. Богомягких. – Ростов на Дону. –1974. –152 с.
7. Бондаренко А.М. Методические основы определения почвенного плодородия по урожайности сельскохозяйственных культур: Сборник науч. тр. /А.М. Бондаренко, Д.Н. Безменников. //Разработка технического оснащения агроинженерной сферы растениеводства. –Зерноград. –2002. –С. 59-64.
8. Бондаренко А.М. Машинная технология дифференцированного внесения средств защиты растений / А.М. Бондаренко, В.И. Вялков // Труды 2-й МНТК по проблеме дифференцированного применения удобрений в системе координатного земледелия “Машинные технологии дифференцированного применения удобрений и мелиорантов” (Россия, Рязань; 24-26 июля 2001 г.) – Рязань: ГНУ ВНИИМС, 2001. - С. 73-75.
9. Булаев Е.В. Основные агротребования к технике локального внесения удобрений //Проблемы комплексной механизации процессов хранения, подготовки и внесения органических, минеральных удобрений, известковых материалов и средств защиты растений: Тез. докл. науч.- произв. конф. 19-20 дек. 1979 г. – Минск. - 1979. –Ч.1. –с. 47...49.
10. Бурмистрова М.Ф. Физико-механические свойства новых видов минеральных удобрений /М.Ф. Бурмистрова, А.М Щербаков. -В кн. Теоретические и экспериментальные исследования физико-механических свойств почв, удобрений и растений./ Труды ВИСХОМ. вып.54. - М. ОНТИ – 1969. - С.111...132.

11. Бруверс П.. Об определении неравномерности сплошного посева извести и других удобрений по полю /П. Бруверс, Ю. Штиканс, У. Карелис //Труды: Латвийская сельхоз. академия. –1977. –вып. 108. –С. 34...39.
12. Василенко А.М. Элементы методики математической обработки результатов экспериментальных исследований /А.М. Василенко. – М.: ВИМ - 1958. – 59с.
13. Василенко П.М. Теория движения частиц по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин /П.М. Василенко. – Киев. Изд. АСН УССР - 1960. – 32с.
14. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных /Г.В. Веденяпин. –М.: Колос. - 1965.– 135с.
15. Вентцель Е.С. Теория вероятностей /Е.С. Вентцель. –М.: Наука -1969. – 576 с.
16. Винярски А. Сегригация механически смешанных гранулированных удобрений во время транспортировки, разгрузки и посева /А. Винярски, Т. Гуцки -В кн.:У111 Международный конгресс по минеральным удобрениям: Доклады. -М. – 1976. т.1.- секция 1-2. - С.249-260
17. Волков В.А. Приближенный расчет движения тел в сопротивляющейся среде /В.А. Волков.- Труды //ВИСХОМ, вып. 24. –М.: ЦНТИ тракторного и сельхозмашиностроения. - 1959. –17 с.
18. Волосников С.И. О работе центробежного аппарата /С.И. Волосников, Ю.И. Якимов. //Тракторы и сельхозмашины -1968. - №8 - С.34.
19. Волосников С.И. Распределение смеси удобрений центробежным аппаратам /С.И. Волосников, Ю.И. Якимов -Труды Кубанского СХИ, вып.121 (149). – Краснодар. – 1976 - С. 42...44.
20. Волошин Н.И. Обеспечение устойчивости технологического процесса работы центробежного аппарата тукорассеивающих машин /Автореф. дисс. ... канд. техн. наук – Краснодар. –1986. –24 с.
21. Гевко Б.М. Функциональные возможности шнековых механизмов /Б.М. Гевко //Тракторы и сельхозмашины - 1987. -№2 -С. 43-44.
22. Гевко Б.М., Рогатынский Р.М. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин. / Гевко Б.М., Рогатынский Р.М. – Львов: Выша шк. при Львовском ун-те. - 1989. –176 с.
23. Главацкий Б.А. Влияние различных факторов на качество приготовления тукосмесей и степень их расслоения при транспортировке и внесении //Бюллетень ВИУА -1971. -№12. –С. 3-6
24. Главацкий Б.А. Некоторые результаты исследований рабочих органов для смешивания минеральных удобрений //Бюллетень ВИУА.- 1974.- №17. -С.117...118.
25. Глезер Ц.Я Качество минеральных удобрений для сухого тукосмешивания /Ц.Я. Глезер, В.К. Дубовая -Труды ВНИИМССХ. - 1975. вып.4. - С.248...261

26. Городецкий П.И. Экспериментальное исследование однодискового центробежного аппарата на рассеве гранулированного суперфосфата /П.И. Городецкий, В.Н. Чунарев. //Тракторы и сельхозмашины – 1966.- №11. - С.37...38.
27. Грызлов В.П. Комплексные удобрения /В.П. Грызлов, Н.И. Синдяшкина, Ю.Г Карцев - М: Россельхозиздат. - 1973. – 265 с.
28. Гужвин В.К. Обоснование параметров и режимов работы спирально-шнекового туковысевающего аппарата в условиях крена /Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. –Зерноград. –2002. –20 с.
29. Догановский М.Г. Машины для внесения удобрений / М.Г. Догановский, Е.В. Козловский. –М.: Машиностроение. - 1972. –272 с.
30. Дубич А.В. Эффективность сложных и смешанных удобрений, вносимых под сахарную свеклу.- В кн.: Пути повышения урожайности и улучшения качества сахарной свеклы и зерновых культур. - М.: Колос. - 1973. –С. 21-28
31. Иванов Ю.А. Основные условия образования динамически устойчивых смесей /Ю.А. Иванов, Б.В. Шорохов–В сб.: Труды /Саратовского СХИ, т.8. - С.89...93.
32. Изотов В.Я. Экспериментальные исследования качества рассева смешанных минеральных удобрений. – В сб.: Механизация и электрификация сельского хозяйства. –Киев,1976, вып. 37. - С. 24...27
33. Истрафилов Н.А. Исследование траекторий полета и распределения грунта при работе роторных канавоочистительных машин /Н.А. Истрафилов. –В кн.: Труды /ЦНИИМЭСХ, т.1. - 1963, - С.322...331.
34. Казачков И.А. Моделирование и оптимизация процесса распределения минеральных удобрений струйно-веерным аппаратом /Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. –Зерноград. –2002. –19 с.
35. Каплан И.Г. Как вносить тукосмеси. //Сельское хозяйство Белоруссии, 1974. - №11.
36. Каплан И.Г. К выбору критериев оценки качества при работе с удобрениями. // В кн.: Механизация земледелия и животноводства. –Минск. - 1982. – С. 10...18.
37. Козловский Е.В. Экспресс-анализатор качества внесения минеральных удобрений /Е.В. Козловский, В.А. Горанчаровский //Тр. Латв. с.-х. акад. вып. 220 –1984. - С. 52 – 55.
38. Комплексная механизация внесения минеральных удобрений: Рекомендации для работников сельского хозяйства. – Зерноград: ВНИПТИМЭСХ. - 1972. – 16 с
39. Концепция автоматизации агропромышленного комплекса /Л.П. Кормановский, Н.В. Краснощеков, И.Ф. Бородин, Э.И. Липкович. –Зерноград. - 1996. – 36 с.
40. Кореньков А.А. Минеральные удобрения и их рациональное применение /А.А. Кореньков. – М.: Россельхозиздат. - 1973. -176 с.

41. Кормановский Л. П. Точное земледелие – новое направление фундаментальных инженерных исследований /Л.П. Кормановский //Техника в сельском хозяйстве –2002. -№1. –С. 3-5.
42. Краснощеков Н.В. Итоги развития агропромышленной науки /Н.В. Краснощеков // Техника в сельском хозяйстве –2002. -№4. –С. 3-8.
43. Кукибный А.А. Метательные машины /А.А. Кукибный. –М.: Машиностроение. - 1964. –194 с.
44. Липкович Э.И. Аналитические основы системы машин /Э.И. Липкович. – Ростов: кн. Изд-во. –1983. –112 с.
45. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов /Ю.И. Макаров - М.: Машиностроение. - 1973. –216 с.
46. Малоносов Н.Л. Физические свойства тукосмесей на основе гранулированных компонентов /Н.Л. Малоносов, Л.Н. Тимофеев /Труды НИИУИФ. –М. – 1976. - вып.229.
47. Марченко Н.М. Механизация внесения органических удобрений /Н.М. Марченко, Г.И. Личман, А.Е. Шебалкин. – М.: Агропромиздат.-1990.– 207 с.
48. Механизация приготовления и внесения твердых минеральных удобрений: Обзорная информация /Л.М. Клятис, А.Б. Максимов –М.: ВНИИТЭИСХ. –1979. –66 с.
49. Механизация внесения минеральных удобрений: Обзор зарубежной литературы /В.М. Верховский, В.П. Поляченко. –М.: Колос. –1965. –189 с.
50. Мельников С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов /С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Роцин. –Л.: Колос. –1972. –200 с.
51. Механизация применения удобрений: Справочник агрохимика / И.К. Рябченко, В.К. Явтушенко, Н.Н. Харченко, В.В. Полякус. –М.: Колос. - 1982. –192 с.
52. Назаров С.И. О дальности полета частиц удобрений в сопротивляющейся среде /С.И. Назаров, И.В. Румянцев. –В кн.: Труды /ЦНИИМЭСХ, т.УП. –Минск, Ураджай. – 1969. - С.45...51.
53. Назаров С.И. Равномерное распределение туковых смесей /С.И. Назаров, И.В. Румянцев, А.А. Докучаев и др. //Техника в сельском хозяйстве, - 1977. - №3. - С. 27-30.
54. Обыденкин Н.В. Рекомендации по организации и технологии смешивания минеральных удобрений /Н.В. Обыденкин.- /ВНИИМССХ. –Рязань. - 1969. – 32 с.
55. Орси́к Л.С. Проблемы инженерной службы АПК России /Л.С. Орси́к //Механизация и электрификация сельского хозяйства –2000. -№4. –С. 6-10.
56. Панников В.Д. Баланс питательных веществ в почвах мира: тенденции и перспективы химизации до 2000 года /В.Д. Панников, С. Н. Юркин //Сельское хозяйство за рубежом (растениеводство)- 1974. - N 1.-С.1 - 9.

57. Сендряков И. Приготовление тукосмесей в колхозах и совхозах /И. Сендряков, Б. Главацкий // Техника в сельском хозяйстве. - 1972, -№11. - С. 15...17.
58. Сендряков И.Ф. Обоснование допустимых показателей неравномерности внесения удобрений центробежными разбрасывателями /И.Ф. Сендряков, Н.Г. Овчинникова, Б.А. Главацкий. –Бюллетень ВИУА. Вып.49- М. - 1980. – С. 3-12.
59. Сендряков И. Контроль за качеством внесения удобрений /И. Сендряков, Б. Главацкий, И. Овчинникова // Земля родная. –1976. -№8. -С. 40...41.
60. Симакин А.И. Удобрения, плодородие почв и урожай в условиях интенсивного земледелия. –Краснодар: Кн. из-во. - 1988. –270 с
61. Скользаев В.А. Элементы теории распределения удобрений дисковым центробежным аппаратом /В.А. Скользаев, В.А. Черноволов. //Тракторы и сельхозмашины - 1969. - №2. - С.27...29.
62. Смаковский Ф.П. Исследование и обоснование процесса смешивания сыпучих минеральных удобрений совместным пневмотранспортированием компонентов. -Автореферат дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук.-М.. -1972.- 20 с.
63. Справочник по минеральным удобрениям. -М.: Госиздат с -.х. литературы . - 1960. – 128 с.
64. Теоретические и экспериментальные исследования физико-механических свойств почв, удобрений и растений: Тр. ВИСХОМ. вып. 54. – М.: ОНТИ. 1969. –333 с.
65. Тихомиров Б.В. Математические методы планирования экспериментов при изучении нетканых материалов /Б.В. Тихомиров. –М.: Легкая индустрия. –1968. –158 с.
66. Удобрения на полях Дона. - Ростовское книжн. изд-во. - 1974.-160 с.
67. Унанянц Т.П. Современное состояние и перспективы применения минеральных удобрений в США: Обзорная информация /Т.П. Унанянц –М.: ВНИИТЭИСХ. -1975. –86 с.
68. Филипов Э.Ф. Влияние размеров гранул и примеси пыли на равномерность
69. Франц Дж. Математические модели в сельском хозяйстве /Дж. Франц, Дж. Х. М. Торили. –М.: Агропромиздат. –1987. –400 с.
70. Хлыстунов В.Ф. Механико-технологическое обоснование технического оснащения системы жизнеобеспечения свиноводства /Дисс ... д-ра техн. наук. – Зерноград. –2000. – 512 с.
71. Черноиванов В.И. Проблемы машинных технологий сельскохозяйственного производства /В.И. Черноиванов //Техника в сельском хозяйстве – 2002. - №5. –С. 3-6.
72. Черноволов В.А. Проблемы совершенствования машин для внесения минеральных удобрений /В.А. Черноволов //Механизация и электрификация сельского хозяйства –2000. - №5. – С. 17-18.

73. Черноволов В.А. Общие закономерности распределения удобрений центробежным дисковым аппаратом /В.А. Черноволов. –В кн.: Материалы /НТС ВИСХОМ, вып.26. –М.: ОНТИ. – 1969. - С.63...71.
74. Шелкунов Н.Н. Микропроцессорные средства и системы /Н.Н. Шелкунов, А.П. Дианов. –М.: Радио и связь. –1989. –288 с.
75. Шеповалов В.Д. Автоматика топоориентированных технологий растениеводства /В.Д. Шеповалов //Техника в сельском хозяйстве –2001.-№1. – С. 3-5.
76. Шмонин В.А. Состояние и тенденции развития конструкций машин для внесения минеральных (твердых) удобрений /В.А. Шмонин, Ю.П., Каюшников, М.Г. Гриценко. /Обзор. Вып.5. –М.: ЦНИИТЭИтракторсельхозмаш - 1979. –24 с.
77. Якубаускас В.И. Технологические основы механизированного внесения удобрений /В.И. Якубаускас. –М.: Колос. - 1973. –231 с
78. Hollmann W. Untersuchngen an Schleuder Düngerstreuerh /W. Hollmann, A. Mathes. //Landtechnische Forschung, 1963.13, h.1, S. 17...24
Inss T.M. The theory of the centrifugal distributor II.Motion on the disc centrefeed //T.M. Inss, A.R. Reese. //J. Agric.Engug. Res., 1962. 7. №4. S. 345...353.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	с. 3
1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВНЕСЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ.....	5
1.2. Роль минеральных удобрений в реализации биологического потенциала растений.....	5
1.3. Физико-механические свойства минеральных удобрений и их смесей.....	10
1.3. Взаимодействие технических средств и агрохимической системы.....	14
1.4. Технологии внесения минеральных удобрений и технические средства для их реализации.....	16
1.5. Показатели, характеризующие эффективность процесса внесения минеральных удобрений и их смесей....	22
1.6. Анализ технических средств и методов совершенствования процесса распределения минеральных удобрений.....	25
1.7. Анализ методов и технических средств управления распределением минеральных удобрений.....	38
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ АДАПТИВНОГО ВНЕСЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ.....	47
2.2. Направления совершенствования процессов адаптивного внесения минеральных удобрений.....	47
2.2. Общий алгоритм управления процессами адаптивного внесения минеральных удобрений	49
2.4. Влияние уровня адаптации технологического процесса на производительность машин.....	63
2.4. Обоснование технологических процессов адаптивного внесения минеральных удобрений.....	67
2.5. Алгоритмы управления технологическими процессами машин.....	73
2.6. Анализ технологического процесса внесения минеральных удобрений	87
2.7. Определение вариабельности почвенного плодородия....	91
3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ.....	98
3.1. Общие положения.....	98
3.2. Распределительный рабочий орган с прямолинейными лопатками.....	99

3.3. Анализ распределения частиц рабочим органом с криволинейными лопатками на наружном диске.....	106
3.4. Создание равномерного распределения частиц в секторе рассева центробежного диска.....	114
4. ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ И ДОЗИРОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ СПИРАЛЬНЫМ ШНЕКОМ	120
4.1 Общие положения и допущения.....	120
4.2 Транспортирование минеральных удобрений спиральным шнеком.....	121
4.3 Истечение минеральных удобрений из высевных отверстий	125
4.4. Распределение минеральных удобрений по поверхности поля.....	131
4.5. Управление процессом высева минеральных удобрений	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	138
ЛИТЕРАТУРА	139

Научное издание

Забродин Виктор Петрович, доктор технических наук профессор ФГОУ ВПО АЧГАА

Бондаренко Анатолий Михайлович, доктор технических наук профессор ФГОУ ВПО АЧГАА

Пономаренко Игорь Григорьевич, кандидат технических наук доцент ФГОУ ВПО АЧГАА

Технологические процессы внесения минеральных удобрений в системах точного земледелия.