

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

И. С. Крук

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ
ШТАНГОВЫХ ОПРЫСКИВАТЕЛЕЙ**

Минск
БГАТУ
2018

Крук, И. С. Научно-технические основы проектирования рабочих органов штанговых опрыскивателей / И. С. Крук. – Минск : БГАТУ, 2018. – 272 с.: ил. – ISBN 978-985-519-954-1.

В монографии обоснованы причины потерь пестицидов при опрыскивании и обозначены направления их снижения. Приведен также анализ ситуаций неравномерности распределения рабочей жидкости по обрабатываемой поверхности при опрыскивании и дан обзор технических решений для обеспечения требуемого качества внесения. Получены математические модели, описывающие колебания штанги в зависимости от схемы ее подвески, используемых демпфирующих и упругих элементов в системе стабилизации.

Издание предназначено для научных работников, конструкторов сельскохозяйственных машин, специалистов АПК, преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов.

Табл. 5. Ил. 145. Библиогр.: 131 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Учреждения образования «Белорусский государственный
аграрный технический университет»
(протокол № 1 от 22 января 2018 г.)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
лаборатории обработки почвы и посева РУП «НПЦ НАН Беларуси
по механизации сельского хозяйства» *Л. Я. Стенук*;

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Управление охраной труда»
Учреждения образования «Белорусский государственный
аграрный технический университет» *Л. В. Мисун*

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВНЕСЕНИЯ СРЕДСТВ ХИМИЗАЦИИ ОПРЫСКИВАНИЕМ.....	9
1.1. Химический метод защиты растений.....	9
1.2. Требования к внесению рабочих растворов пестицидов полевыми опрыскивателями.....	16
1.3. Техническое обеспечение технологий опрыскивания в растениеводстве.....	22
1.3.1. Авиационное внесение пестицидов.....	24
1.3.2. Наземное внесение пестицидов.....	25
1.3.3. Общее устройство и принцип работы опрыскивателя....	28
1.4. Потери пестицидов при опрыскивании и способы их уменьшения.....	51
1.4.1. Испарение мелких капель.....	52
1.4.2. Скатывание крупных капель с обрабатываемой поверхности.....	53
1.4.3. Огрехи и перекрытия соседних проходов.....	54
1.4.4. Снос препаратов ветром.....	55
1.4.5. Распределение рабочей жидкости вдоль линии движения опрыскивателя и по ширине штанги опрыскивателя.....	61
1.4.5.1. Соблюдение норм внесения при изменении рабочей скорости.....	62
1.4.5.2. Оптимальный выбор высоты установки штанги.....	63
1.4.5.3. Обеспечение расстояния между распылителями и обрабатываемой поверхностью по всей длине штанги.....	64
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ШТАНГИ ПОЛЕВОГО ОПРЫСКИВАТЕЛЯ.....	111
2.1. Особенности использования различных математических моделей для исследований процесса колебаний штанги полевого опрыскивателя.....	111
2.1.1. Модель колебаний штанги при движении опрыскивателя по ровной поверхности.....	111

2.1.2. Модель колебаний штанги при использовании демпфирующих элементов.....	115
2.1.3. Модель вынужденных колебаний штанги без использования демпфирующих элементов.....	118
2.1.4. Модель вынужденных колебаний штанги с учетом использования демпфирующих элементов.....	120
2.2. Уравнения гиперболического типа для описания колебаний штанги.....	122
2.3. Определение сдвига точек штанги в случае свободных колебаний.....	124
2.3.1. Модель штанги неограниченной длины.....	124
2.3.2. Модель штанги ограниченной длины.....	130
2.4. Модель продольных колебаний штанги.....	133
3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПОДВЕСОК ШТАНГ И СИСТЕМ ИХ СТАБИЛИЗАЦИИ И ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА НАКЛОНА.....	142
3.1. Конструкции подвесок штанг и систем их стабилизации и изменения угла наклона.....	142
3.2. Теоретические исследования жестко закрепленной штанги на раме опрыскивателя.....	152
3.2.1. Колебания штанги без учета изгиба ее несущей конструкции.....	152
3.2.2. Колебания штанги в вертикальной плоскости с учетом изгиба ее конструкции.....	159
3.2.3. Колебания штанги в горизонтальной плоскости с учетом изгиба ее конструкции.....	176
3.3. Особенности колебательного процесса штанги при использовании различных демпфирующих элементов в системе стабилизации.....	179
3.3.1. Использование амортизаторов в системе стабилизации.....	179
3.3.2. Определение параметров колебаний штанги при использовании в системе стабилизации упругих элементов.....	183
3.3.3. Исследования колебаний штанги при совместном использовании различных демпфирующих элементов.....	192

3.4. Теоретические исследования влияния колебаний штанги на равномерность распределения рабочего раствора пестицидов по обрабатываемой поверхности.....	203
3.4.1. Закономерности падения капель рабочей жидкости.....	203
4. МЕХАНИЗМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОСТОЯНСТВА РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ШТАНГОЙ И ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПОЛЯ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ РЕЛЬЕФОМ.....	224
4.1. Основные параметры установки штанги относительно обрабатываемой поверхности.....	224
4.2. Конструкции механизма изменения угла наклона штанги электрического и гидравлического действия.....	231
4.3. Система микропроцессорного автоматизированного управления штангой опрыскивателя (СМАР).....	233
4.4.1. Принципы и алгоритмы работы элементов системы.....	235
5. МЕТОДИКИ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	243
5.1. Оборудование для оценки равномерности распределения рабочей жидкости по ширине захвата.....	243
5.2. Выбор целевых функций для оценки эффективности подвесок и систем стабилизации штанги.....	251
6. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	253
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	259
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	260

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных элементов современных технологий возделывания сельскохозяйственных культур является защита растений от вредных организмов, болезней и сорняков, так как природно-климатические условия республики благоприятны для развития и распространения более 65 опасных видов вредителей, 100 видов болезней и 300 видов сорных растений [1]. Интегрированная система защиты от болезней, вредителей и сорняков является важнейшим элементом современных систем эффективного ведения сельскохозяйственного производства и включает агротехнические, биологические, химические, физико-механические методы и средства, из которых химический метод является самым распространенным в нашей республике.

Анализ тенденций развития и совершенствования способов ведения современного сельского хозяйства показывает, что повышение урожайности сельскохозяйственных культур немислимо без применения средств химизации. Для эффективности применения химических средств защиты растений, которая является комплексной, включающей как технические, экономические, организационные, так и экологические аспекты, решающее значение имеет ее техническое обеспечение.

По данным ООН, вредители и болезни уничтожают ежегодно $\frac{1}{5}$ часть мирового производства сельскохозяйственной продукции, а общемировые потери в земледелии составляют 75 млрд дол. США, в том числе: от вредителей – 30, болезней растений – 25 и от сорняков – 20 млрд дол. США [2]. Поэтому правильно организованная система защиты урожая является большим резервом повышения продуктивности земледелия.

В настоящее время наиболее распространенным является химический метод, основанный на внесении рабочего раствора пестицидов. Однако рост объемов использования пестицидов при несовершенстве технологий и технических средств, несоблюдении агротехнических и технологических требований приводит к избыточному накоплению их в почве, что влечет за собой не только загрязнение сельскохозяйственной продукции, но и повышение нагрузки на экологию окружающей среды (загрязнение водоемов, грунтовых вод, угнетение жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, уничтожение полезной флоры) [4]. Поэтому необходимыми

условиями проведения операций химической защиты посевов культур являются: обеспечение качества конечной продукции, охрана окружающей среды, сохранение оптимального равновесия в экосистеме.

Эффективность использования пестицидов зависит от сроков обработки, равномерности распределения препарата по объекту обработки, нормы расхода рабочей жидкости и ее экологической безопасности. Все это предъявляет жесткие требования к конструкциям широкозахватных сельскохозяйственных опрыскивателей, которые должны обеспечивать качественную обработку при минимальных потерях и расходе раствора рабочей жидкости.

Работа опрыскивателей предусматривает последовательное выполнение следующих технологических операций: 1) приготовление рабочего раствора пестицидов, 2) его дозирование, 3) подача, 4) распыление и 5) транспортирование капель к обрабатываемой поверхности.

Агрегаты должны обеспечивать качественное внесение пестицидов при наименьших расходе и потерях рабочего раствора. Одним из показателей качества является равномерность распределения рабочего раствора по обрабатываемой поверхности в продольном и поперечном направлениях, которая определяется правильной работой распылителей, постоянством расстояния между ними и обрабатываемой поверхностью в процессе работы агрегата. При движении колеса опрыскивателя копируют микронеровности поверхности поля, которые приводят к возмущениям, передающимся через раму штанге, вызывая ее колебания в вертикальной плоскости. Кроме того, непостоянство рабочей скорости движения агрегата приводит к колебаниям штанги в горизонтальной плоскости в направлении его движения. В результате этого неравномерность распределения рабочего раствора по ширине захвата агрегата может достигать 30...135 % [3], что влечет снижение эффективности химической защиты и повышение нагрузки на экологию окружающей среды.

Современный уровень развития средств механизации процессов химизации в растениеводстве характеризуется возрастающими требованиями, предъявляемыми к конструкции широкозахватных сельскохозяйственных опрыскивателей. Данные агрегаты должны обеспечивать качественную обработку растений при минимальных потерях и расходе раствора рабочей жидкости. Требуемые условия выполнимы при оптимальной совместной работе распределяющей,

распыляющей и дозирующей систем опрыскивателя. Высокий технический уровень опрыскивателей определяется системой подвески несущей конструкции распределительной штанги, имеющей системы стабилизации, регулировки высоты и угла ее наклона, системы для перевода секций в рабочее и транспортное положение. Именно в совершенствовании данных систем и их конструкций заложен резерв снижения удельной материалоемкости, увеличения надежности опрыскивателей и повышения качества выполняемого ими технологического процесса.

Важным направлением является усовершенствование конструкции штанговых опрыскивателей путем установки приспособлений и механизмов, позволяющих повысить качество внесения пестицидов, снизить их потери и воздействие на экологию и улучшить условия эксплуатации.

Поэтому исследование и разработка технологий и средств механизации, позволяющих качественно и с наименьшими потерями выполнить технологические операции защиты растений, является важной задачей.

Сформулированные и полученные в работе результаты в совокупности с научными положениями вносят определенный вклад в развитие технического обеспечения внесения рабочих растворов пестицидов штанговыми опрыскивателями, элементов автоматизации технологического процесса и теории колебаний штанговых рабочих органов.

Автор выражает благодарность рецензентам: доктору технических наук, профессору Александру Ивановичу Бобровнику и доктору технических наук, профессору Леониду Владимировичу Мисуну за существенные замечания и благие пожелания. Отдельная благодарность редактору Тамаре Владимировне Каркоцкой за дельные замечания, поддержку и оформление материала монографии.

Монография издана в соответствии с планом издания научно-технической и научно-методической литературы по МСХП РБ на 2018 год от 14.05.2018 г.

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВНЕСЕНИЯ СРЕДСТВ ХИМИЗАЦИИ ОПРЫСКИВАНИЕМ

1.1. Химический метод защиты растений

Химический метод защиты растений на сегодняшний день остается самым распространенным по сравнению с другими методами благодаря ряду преимуществ – универсальности, высокой эффективности (технической, хозяйственной, экономической), производительности труда, индустриальности, рентабельности, высокому уровню механизации. Универсальность (как главное его преимущество) базируется на широком ассортименте средств химической защиты – пестицидов. Их применение позволяет не только улучшить качество и увеличить урожай сельскохозяйственной продукции, но и значительно сэкономить энергетические и трудовые ресурсы. При этом обеспечивается повышение урожая зерновых культур на 25,0 % (в том числе пшеницы – 49 %), картофеля – 31,5, сахарной свеклы – 24,5, овощных культур – в среднем на 27,0 % [1, 5–7].

Современные пестициды – это широкий спектр веществ, входящих в различные классы химических соединений. Их разнообразие определяется существованием большого количества видов сорняков, вредителей и болезней культурных растений. Все пестициды подразделяются на отдельные группы и подгруппы в зависимости от природы действующего вещества, производственного (практического) назначения, путей и способов проникновения в организм, спектра действия и пр.

Сельскому хозяйству поставляются пестициды в виде готовых к применению препаративных форм (масляные растворы для ультрамалообъемного опрыскивания, гранулированные препараты), водных растворов, концентратов эмульсий, водорастворимых концентратов, смачивающихся порошков, суспензий, растворимых кристаллических и порошковидных веществ, паст, предназначенных для приготовления рабочих жидкостей заданной концентрации, а также сухих порошковидных препаратов. Перечисленные препаративные формы пестицидов обладают характерными признаками, которые определяют технологию ведения химзащитных

работ. Наиболее широкое применение находят жидкие пестициды, которые должны обеспечивать: низкую летучесть, удерживающую капли препарата от быстрого испарения и сноса за пределы обрабатываемого участка; относительно хорошую текучесть без больших отклонений вязкости в условиях переменных температур, способствующей сохранению дозировок и удерживанию капли на обрабатываемой поверхности.

В сельскохозяйственном производстве химический метод осуществляется следующими способами: опыливание, обработка аэрозолями, протравливание, фумигация, опрыскивание.

Опыливание – процесс нанесения химических препаратов в порошкообразном, сухом или увлажненном состоянии на поверхности обрабатываемых растений. При опыливании обеспечивается тонкий распыл препарата по поверхности растений, сокращаются затраты времени на подготовку и заправку машин. Недостатки данного способа: слабая прилипаемость порошка к поверхности растений (в объеме 3...5 % добавляются минеральные масла) и сильное влияние ветра (размер частиц при наземном способе опыливания – 15...25 мкм; при авиационном – 25...40 мкм).

Обработка аэрозолями заключается в распылении мельчайших частиц твердого (дым) или жидкого (туман) пестицида. Дымы обычно получают от сжигания без пламени при значениях температуры не выше 180 °С специальных дымовых шашек и других материалов с пестицидами. Туманы получают из жидкого раствора механическим, термическим или термомеханическим способами. Дымы применяются для дезинфекции помещений, туманы используются как в помещениях, так и в полевых условиях. При использовании данного способа значительно уменьшается расход препарата, увеличивается производительность машин, улучшается равномерность покрытия, повышается качество работ. При этом аэрозоли легко относятся воздушными потоками в сторону и вверх и подвержены высокой испаряемости.

Протравливание – процесс обработки специальными препаратами посевного и посадочного материалов. Протравливание может быть сухое, полусухое и мокрое. Сухое протравливание проводят за 2...6 месяцев до посева. При этом материал тщательно перемешивают с сухим порошкообразным препаратом. Полусухое протравливание проводят за несколько дней до посева. Перед началом

работ семена смачивают раствором протравителя с высокой концентрацией, но малыми дозами, после чего проветривают. Мокрое протравливание проводят непосредственно перед посевом. При этом семена смачивают раствором с более низкой концентрацией и 2...3 часа выдерживают под брезентом, после чего просушивают до нормальной влажности.

Фумигация заключается в насыщении ограниченного пространства сильнодействующими, быстро испаряющимися веществами. Фумигацию успешно применяют в закрытых помещениях, на складах, зернохранилищах, в теплицах, оранжереях, зерновых буртах под брезентом, для обработки животных в специальных камерах, на почве – для уничтожения возбудителей болезней корневой системы растений.

Сущность опрыскивания заключается в нанесении химических препаратов в жидко-капельном состоянии в виде растворов, эмульсий, суспензий на растения, тела насекомых и поверхности других объектов. Преимуществом опрыскивания является сравнительно малый расход пестицида, при этом требуется большой расход воды ($200...600 \text{ л} \cdot \text{га}^{-1}$ для полевых культур; $1000...2000 \text{ л} \cdot \text{га}^{-1}$ – для садов). Процесс внесения капель сопровождается их испарением и сносом ветром.

В зависимости от типа (внутрипочвенный, поверхностный, контактный) и физической формы (гранулы, пена, жидкость) пестицидов и площади, покрываемой за один проход агрегата, известны следующие технологические методы их внесения [4–12]: 1) сплошное опрыскивание, 2) локальное опрыскивание, 3) внесение в почву, 4) внесение в форме гранул, 5) в виде пены или 6) при орошении (гербигация).

Одним из самых распространенных методов внесения химических средств защиты растений от вредителей, болезней и сорняков является опрыскивание, при котором пестициды в виде распыленной рабочей жидкости наносятся на обрабатываемый объект. На долю этого метода приходится более 95 % химзащитных работ [4, 5, 6, 7].

Известны два способа опрыскивания: штанговое (наземное и авиационное) и дистанционное [4, 6].

Авиационное опрыскивание находило до недавнего времени достаточно широкое применение. Преимуществами этого способа

являются: высокая производительность (при норме опрыскивания 25 л·га⁻¹ производительность авиации почти в 8 раз выше по сравнению с наземными машинами); отсутствие механических повреждений растений; проведение обработок без уплотнения почвы колесами тракторов; возможность проводить работы в условиях высокой влажности почвы, когда движение наземных машин затруднено. К недостаткам можно отнести повышенную себестоимость (при норме опрыскивания 25 л·га⁻¹ себестоимость на 13 % выше в сравнении с наземными машинами), наличие полей площадью не менее 3 га, при этом длина гона должна быть не менее 500 м для самолетов и 200 м для вертолетов; предельные расстояния перелетов с аэродрома до поля для эффективной работы самолетов – 10 км, вертолетов – 1 км (один аэродром исключает из севооборота около 30 га); снос ветром капель в 4...6 раз больше по сравнению с наземными (отмечен снос гербицидов и повреждение сельскохозяйственных культур [13]).

При авиационном опрыскивании не всегда возможно достичь необходимого качества обработки. Из-за большой высоты опрыскивания (самолеты и вертолеты не спускаются ниже 5...10 м) размер капель уменьшается со 100 до 50 мкм, и происходит их снос за пределы обрабатываемой зоны. Значительный снос ветром распыленной жидкости за пределы обрабатываемого участка, достигающий нескольких километров, обуславливает отказ от авиационного опрыскивания в пользу наземного. Исследованиями установлено, что потери гербицидов при сносе достигают 20...90 % [14]. До 70 % объема распыленной жидкости и до 80 % объема порошков вносимых пестицидов не достигают объекта обработки [15, 16]. Облако распыленной жидкости может переноситься на большие расстояния. Повреждения сельскохозяйственных культур иногда обнаруживаются на расстоянии 20 км.

Кроме того, авиационное опрыскивание при высокой температуре и небольшой влажности приводит к существенным потерям пестицидов и увеличению нагрузки на окружающую среду вследствие испарения капель.

Помимо низкого качества обработки и нарушения требований экологической безопасности, отказ от применения классической авиации (большие самолеты, вертолеты) для защиты растений

в Беларуси обоснован мелкими контурами полей, насыщенностью воздушными линиями электропередач, необходимостью наличия взлетно-посадочных полос.

При дистанционном опрыскивании распыленную жидкость наносят на обрабатываемый объект воздушным потоком, в том числе и используя ветер. Во время обработок опрыскиватель движется перпендикулярно или под углом 45° к направлению движения ветра. Рабочим органом опрыскивателя является сопло, которое нагнетает воздух от вентилятора. Достоинство дистанционного опрыскивания состоит в простоте конструкции машины и ее обслуживания, высокой маневренности и большой ширине захвата, следовательно, в высокой производительности. Однако этому способу присущи недостатки, делающие его применение крайне нежелательным: существенный снос распыленной жидкости ветром и значительная неравномерность распределения препарата по ширине захвата (рис. 1.1, *a*). К тому же, ширина захвата дистанционных опрыскивателей зависит от скорости и направления ветра и поэтому не является постоянной величиной [17], в связи с чем при возделывании полевых сельскохозяйственных культур предпочтение отдается наземному штанговому опрыскиванию как наиболее эффективному и безопасному, при котором препарат в виде распыленной рабочей жидкости наносится на обрабатываемый объект. Результаты многочисленных исследований свидетельствуют о том, что штанговые опрыскиватели имеют в 2...3 раза большую равномерность распределения рабочей жидкости на обрабатываемом объекте, чем дистанционные. Метод опрыскивания, при всей кажущейся его простоте, является сложнейшим технологическим процессом. Развитие данного метода основано на механике и физике образования и осаждения жидкостных полидисперсных систем с различной степенью диспергирования капель, размеры которых исчисляются от единиц и десятков микрометров до нескольких миллиметров [4–7].

Штанговые опрыскиватели обеспечивают наиболее низкую неравномерность по ширине захвата. Неравномерность распределения рабочей жидкости штанговыми опрыскивателями в 4,3 раза меньше, чем вентиляторными (рис. 1.1) [6, 18].

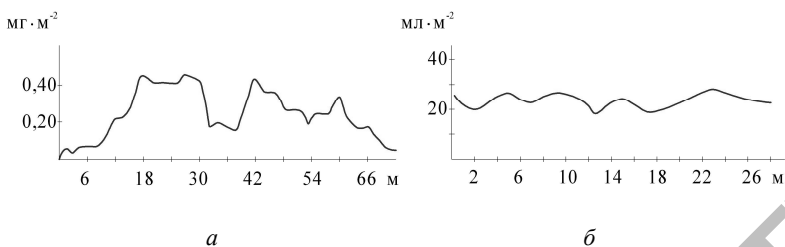


Рис. 1.1. Графики распределения рабочей жидкости по ширине захвата опрыскивателей различного типа: а – вентиляторный; б – штанговый

Диаметр капель позволяет разделить опрыскивание на высокодисперсное (0,025...0,050 мм), мелкокапельное (0,051...0,150), крупнокапельное (более 0,15 мм) [4–7].

В зависимости от объема вносимой на единицу обрабатываемой площади рабочей жидкости различают ультрамалообъемное опрыскивание (5 л·га⁻¹ – полевые культуры и 5...25 – многолетние насаждения), малообъемное (10...50 л·га⁻¹ – вентиляторные или авиационные опрыскиватели и 50...200 – штанговые наземные), объемное (200...300 л·га⁻¹), многообъемное (более 300 л·га⁻¹) [4–7, 19]. Норма расхода действующего вещества при различных видах опрыскивания в большинстве случаев сохраняется на одном уровне, изменяются лишь концентрация и степень дисперсности рабочего раствора. С помощью данных методов вносится 75,5 % всех используемых в сельскохозяйственном производстве пестицидов: при полнообъемном опрыскивании – 30,0 %; при малообъемном – 45,0; при ультрамалообъемном опрыскивании – 0,5 %. Остальные 24,5 % средств защиты растений расходуются: при протравливании посевного и посадочного материала – 19,5; аэрозольной обработке – 2,0; внесении гранулированных препаратов – 1,0 и при опыливания – 2,0 % [4, 5, 20].

Применение ультрамалообъемного опрыскивания (УМО) началось за рубежом в 60-х гг. XX в., и значительно позже – в республике Беларусь. Для УМО не требуется растворитель (вода), а вследствие низких норм расхода рабочего раствора этот способ обработки производителен и малотрудоемок. Наряду с этим технология УМО имеет и существенные недостатки: сильная зависимость

качества обработки от метеорологических условий, значительный снос рабочей жидкости. При скорости ветра, близкой к $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, количество сносимой распыленной жидкости по отношению к осевшей на ширине захвата составляет от 20 до 50 % [4, 14]. Возникают сложности в дозировании препарата, так как к каждому распылителю должно подаваться равное количество жидкости. Кроме того, расход жидкости через распылители зависит от ее вязкости, которая меняется в зависимости от температуры окружающей среды. Сложным является контроль работы распылителей из-за плохой видимости факела распыла. Вследствие высокой агрессивности препаратов для УМО требуется применение высококачественных коррозионно-стойких материалов при изготовлении узлов опрыскивателя. Все эти недостатки значительно увеличивают стоимость машины и себестоимость работ по защите растений.

Малообъемное опрыскивание (МО) является одним из наиболее прогрессивных способов применения пестицидов и обладает рядом преимуществ. При его использовании отмечается: 1) возрастание производительности машин вследствие увеличения коэффициента использования рабочего времени смены; 2) снижение затрат труда; 3) достижение более высокого качества обработки, в частности, лучшее проникновение капель в глубину растительного покрова и более высокая равномерность покрытия; 4) отсутствие стекания рабочей жидкости с поверхности растений на почву; 5) сокращение срока обработки. Осадок пестицидов, образовавшийся после испарения жидкости, дольше удерживается на растении, менее подвержен воздействию ветра, росы, дождя, солнечных лучей, сохраняя при этом токсичность к вредным организмам [4, 6].

Суть малообъемного опрыскивания заключается в эффективном и рациональном использовании раствора рабочей жидкости, который диспергируется в капли оптимальных размеров и равномерно наносится на обрабатываемую поверхность. Поэтому малообъемное опрыскивание является экономически эффективным, энергоресурсосберегающим и более безопасным в экологическом отношении технологическим приемом. К недостаткам данного метода следует отнести необходимость точной дозировки препарата и повышенные требования к техническому состоянию опрыскивающей аппаратуры. При невыполнении данных требований возможно не только повреждение

растений (ожог листьев растений крупными каплями раствора высокой концентрации), но и загрязнение окружающей среды. Однако, несмотря на недостатки, МО нашло широкое распространение (по сравнению с полнообъемным).

Объемное опрыскивание (ОО), хотя и является более трудоемким и менее производительным приемом, находит широкое применение в растениеводстве.

Полнообъемное опрыскивание (ПО) необходимо отнести к наиболее консервативным и наименее производительным способам сплошного опрыскивания. Его основные недостатки: низкая производительность агрегатов из-за частых остановок для заправки рабочей жидкостью, в результате чего коэффициент рабочего времени смены в производственных условиях иногда имеет значение менее 0,5; большие удельные энергозатраты. Еще один недостаток данного способа – загрязнение почвы пестицидами, которые стекают с растений в результате их излишнего смачивания [4].

Массовое применение средств защиты растений в сельском хозяйстве создает значительные пестицидные нагрузки на окружающую среду и повышает вероятность накопления их остаточных количеств в конечной продукции и почве. Это требует совершенствования технологии применения пестицидов в направлении снижения расхода препаратов и защиты окружающей среды от загрязнения.

Эффективность химической защиты и степень ее воздействия на окружающую среду зависят от качества внесения пестицидов, которое, наряду с другими факторами, определяется конструкцией и состоянием технических средств химизации.

1.2. Требования к внесению рабочих растворов пестицидов полевыми опрыскивателями

Решающее влияние на эффективность использования пестицидов оказывают сроки обработки, равномерность распределения препарата по объекту обработки, норма расхода рабочей жидкости и ее экологическая безопасность. Опрыскивание считается эффективным, когда проводится в нужный момент и обеспечивает максимальное покрытие

целевого объекта необходимым количеством препарата, безопасным для человека, животных и окружающей среды.

Большой ассортимент пестицидов выдвигает требования универсальности технологического процесса опрыскивания с регулируемым диапазоном параметров: нормы расхода рабочей жидкости, распределения распыленной жидкости, пределов диспергирования, густоты и полноты покрытия обрабатываемой поверхности растений каплями рабочей жидкости.

Сроки проведения технологических операций

Сроки обработки важны настолько, что ошибки при их выборе не компенсирует даже современная опрыскивающая аппаратура и самые эффективные препараты. Несвоевременная обработка не только снижает эффективность, но и влечет необходимость проведения повторных действий, что приводит к непроизводительным потерям и повышенной нагрузке на экологию.

Норма расхода рабочей жидкости

В зависимости от нормы расхода рабочей жидкости опрыскивание делится на ультрамалообъемное, малообъемное и полнообъемное. При ультрамалообъемном опрыскивании расход рабочей жидкости на полевых культурах составляет от 1 до 5 л·га⁻¹, при малообъемном – от 10 до 200 л·га⁻¹, при полнообъемном – свыше 300 л·га⁻¹ [4, 19, 21].

Распределение распыленной рабочей жидкости

Распределение рабочей жидкости по объекту обработки зависит от ряда причин: неравномерности распределения в продольном и поперечном направлениях движения опрыскивателя, скорости ветра, состояния воздуха.

При опрыскивании полевых культур является важным обеспечение как можно более равномерного распределения рабочей жидкости по объему обрабатываемых растений: по всем ярусам – верхнему, среднему, нижнему, наружной и внутренней поверхностям листьев, стеблям. Необходимость обработки всего растения продиктована биологическими особенностями большинства полевых сельскохозяйственных культур. Эта особенность состоит, прежде всего, в том, что вредные организмы и возбудители болезней

обитают и размножаются не только на поверхности, но и во внутренней зоне растения, где формируются наиболее благоприятные условия для их жизнедеятельности.

Равномерное распределение рабочей жидкости позволяет снизить расход пестицидов без уменьшения технической эффективности. Так как стоимость пестицидов составляет более половины затрат на защиту растений, то уменьшение расхода дает значительный экономический эффект.

Неравномерность распределения по ширине захвата зависит от типа опрыскивателя, постоянства рабочей ширины захвата, типа, конструкции и расположения распылителей.

Для штанговых опрыскивателей неравномерность распределения рабочей жидкости включает в себя две составляющие:

- неравномерность продольного распределения рабочей жидкости по ходу движения опрыскивателя;
- неравномерность распределения рабочей жидкости вдоль штанги опрыскивателя (ширине захвата).

Неравномерность продольного распределения зависит от постоянства оборотов двигателя и скорости движения опрыскивателя по полю, наличия и конструкции системы стабилизации штанги в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Немаловажное значение имеет и состояние поверхности поля, то есть наличие неровностей. При соблюдении требуемых технологических режимов работы эту составляющую неравномерности внесения можно свести к минимуму.

Неравномерность распределения рабочей жидкости вдоль штанги опрыскивателя характеризуется коэффициентом вариации. На каждый процент неравномерности распределения рабочей жидкости приходится 0,4 % (по объему) его непроизводительного использования, то есть если опрыскиватель распределяет рабочую жидкость с коэффициентом вариации 20 %, то около 8 % раствора пестицида теряется [4].

Чтобы избежать указанных выше потерь, можно значительно снизить дозировку пестицида на единицу площади. На рис. 1.2 представлена зависимость эффективности применения пестицидов от неравномерности их внесения, выявленная в результате исследований шведских ученых [4].

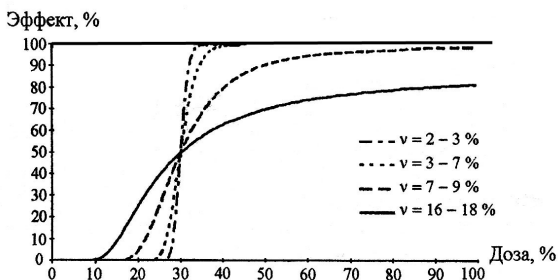


Рис. 1.2. Графические зависимости эффективности применения пестицидов при различной неравномерности их распределения

Анализ графиков (рис. 1.2) показывает, что при коэффициенте вариации менее 7 % достигается 100%-ная эффективность при снижении дозы внесения более чем в 2 раза. В случае высокой неравномерности (более 16 %) невозможно достичь приемлемой эффективности даже при полной дозе применения препарата. Приведенные данные позволяют рассматривать неравномерность распределения как один из важнейших показателей качества опрыскивания.

Коэффициент вариации распределения жидкости по обрабатываемой поверхности не должен превышать: в США – 5 %, в Германии и Англии – 7, во Франции – 10, в России – 15 %. В соответствии с существующими для условий Беларуси агротехническими требованиями неравномерность распределения рабочей жидкости по ширине захвата машины не должна превышать 15 %, неравномерность расхода рабочей жидкости между распылителями – не более 5 % [4, 18].

Степень покрытия

Для получения хороших биологических результатов важной является степень покрытия обрабатываемого объекта отдельными каплями распыла. Степень покрытия – это отношение площади поверхности, покрытой рабочей жидкостью пестицида, к общей площади поверхности объекта обработки. Степень покрытия поверхности объекта обработки определяется не только физическими свойствами капель пестицида (плотность, прилипаемость, смачивание, поверхностное натяжение и т. д.), но и состоянием окружающей среды, физиологическими свойствами объекта.

Соударение капель с поверхностью листьев растений – сложный, малоизученный процесс, который определяется размером и скоростью движения капель, свойствами жидкости, свойствами и состоянием поверхности, скорости ветра, наличием росы и т. д. При этом частицы пестицида могут скатываться или смываться с листьев, испаряться, растекаться и перераспределяться по их поверхности. Однако во всех случаях капли растворов пестицида диаметром менее 400 мкм производят больший эффект, чем капли с большего диаметра.

В результате анализа экспериментального материала установлено, что для различных видов пестицидов степень покрытия должна быть: не менее 0,5...1,0 % – для гербицидов; 2,0...3,0 % – для инсектицидов и фунгицидов. Указанные значения степени покрытия являются критическими, так как их уменьшение ведет к резкому снижению эффективности применения пестицидов [4].

Степень покрытия зависит от двух параметров: густоты покрытия и размера капель.

Густота покрытия

Густота покрытия, или количество капель на целевом объекте, зависит от препарата, культуры, вредителей, вида сорняков и их чувствительности.

Для большинства дождевых гербицидов достаточно 20 капель на 1 см² целевого объекта. Для послежидкового применения гербицидов рекомендуется 30...40 капель на 1 см² целевого объекта [4–7]. Для получения хорошего биологического эффекта при обработке фунгицидами и инсектицидами, обладающими контактным действием, требуется 50...70 капель на 1 см². Общее требование к штанговым опрыскивателям – покрытие каплями 80 % верхней и 60 % нижней листовой поверхности [4, 6].

Пределы диспергирования рабочей жидкости (размер капель)

Для каждого вида опрыскивания характерен определенный размер капель факела распыла. По этому показателю опрыскивание делится: на аэрозольное – со средним диаметром капель до 50 мкм, мелкокапельное – от 50 до 150, среднекапельное – от 150 до 300, крупнокапельное – свыше 300 мкм [4, 6].

Размер капель раствора рабочей жидкости – существенный фактор, влияющий на эффективность применения пестицидов. Чем больше

капель попало на единицу площади, тем лучший эффект. Необходимо отметить, что для каждого конкретного случая существует свой оптимальный размер капель, зависящий от многих факторов: вида растения, его состояния, применяемого препарата, интенсивности сноса частиц ветром, рассеивания их в приземном слое атмосферы, испаряемости рабочей жидкости, смачиваемости листовой поверхности, размеров обрабатываемого участка и пр.

Препараты преобладающего контактного действия вносят методом крупнокапельного опрыскивания. Предельными считаются капли диаметром 0,4 мм, так как они, стекая с листьев сорняков, не дают нужного эффекта. При обработке системными гербицидами преобладающего листового действия рекомендуется диаметр капель 0,1...0,2 мм, так как капли меньшего размера более равномерно покрывают обрабатываемую поверхность, хотя и увеличивают опасность сноса и потери препарата. Почвенные гербициды вносятся в виде капель диаметром 0,3...0,5 мм [4, 19].

Кроме перечисленных параметров физической и биологической эффективности, существенное влияние оказывают и такие показатели, определяющие производительность опрыскивания, как рабочая скорость опрыскивателей, ширина захвата.

Рабочая ширина захвата штанговых опрыскивателей должна быть кратной ширине захвата посевных и посадочных агрегатов. Диапазон рабочих скоростей – 4...12 км·ч⁻¹.

Состояние окружающей среды

Все работы с пестицидами в жаркую погоду (значения температуры окружающего воздуха выше +27 °С) должны проводиться в ранние утренние часы и вечером при отсутствии восходящих потоков воздуха. Это требование объясняется увеличением концентрации пестицидов в воздухе вследствие испарения капель, затруднениями использования средств индивидуальной защиты и спецодежды, увеличением опасности отравления. В пасмурную и прохладную погоду работа может проводиться в дневные часы за 2 ч до выпадения осадков.

Установлено, что из зоны обработки сносятся все капли диаметром менее 80 мкм при скорости ветра до 0,25 м·с⁻¹ и менее 250 мкм – до 0,8 м·с⁻¹ [4, 7]. При движении по полю тракторного агрегата в безветренную погоду со скоростью 10 км·ч⁻¹ за ним

создается турбулентный след возмущенных воздушных масс, движущихся в поперечном направлении со скоростью до $0,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ [4, 5, 21]. Это также приводит к выносу пестицидов из зоны обработки и насыщению ими воздуха. Воздействие ветра на каплю рабочего раствора будет обязательным от момента ее вылета из сопла распылителя до момента оседания. Поэтому существует ограничение на проведение химзащитных работ в ветреную погоду: опыливание растений наземной аппаратурой допускается при скорости ветра не более $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$; опрыскивание с использованием полевых штанговых опрыскивателей – не более $4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$; вентиляторных – не более $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

При проведении технологических операций химической защиты растений в случае несоблюдения агротехнических требований возникают потери пестицидов.

1.3. Техническое обеспечение технологий опрыскивания в растениеводстве

Борьба с вредителями, болезнями и сорняками в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур может осуществляться несколькими методами: механическим (многократные механические обработки), раздельно-комбинированным (механические и химические операции выполняются разными агрегатами как раздельные технологические операции) и комбинированным (механическая и химическая обработки совмещаются в одну технологическую операцию, выполняемую комбинированным агрегатом за один проход по полю) [4, 7] (рис. 1.3).

Разнообразие технологий применения пестицидов потребовало создания соответствующих средств механизации, которые можно условно разделить на три группы: агрегаты для борьбы механическим методом, агрегаты для борьбы химическим методом и комбинированные агрегаты, совмещающие за один проход по полю механическую и химическую обработки.

Несмотря на большое разнообразие опрыскивателей, проблема качественного выполнения технологического процесса опрыскивания, обеспечивающего эффективную защиту растений от вредителей, болезней и сорняков, остается достаточно острой.

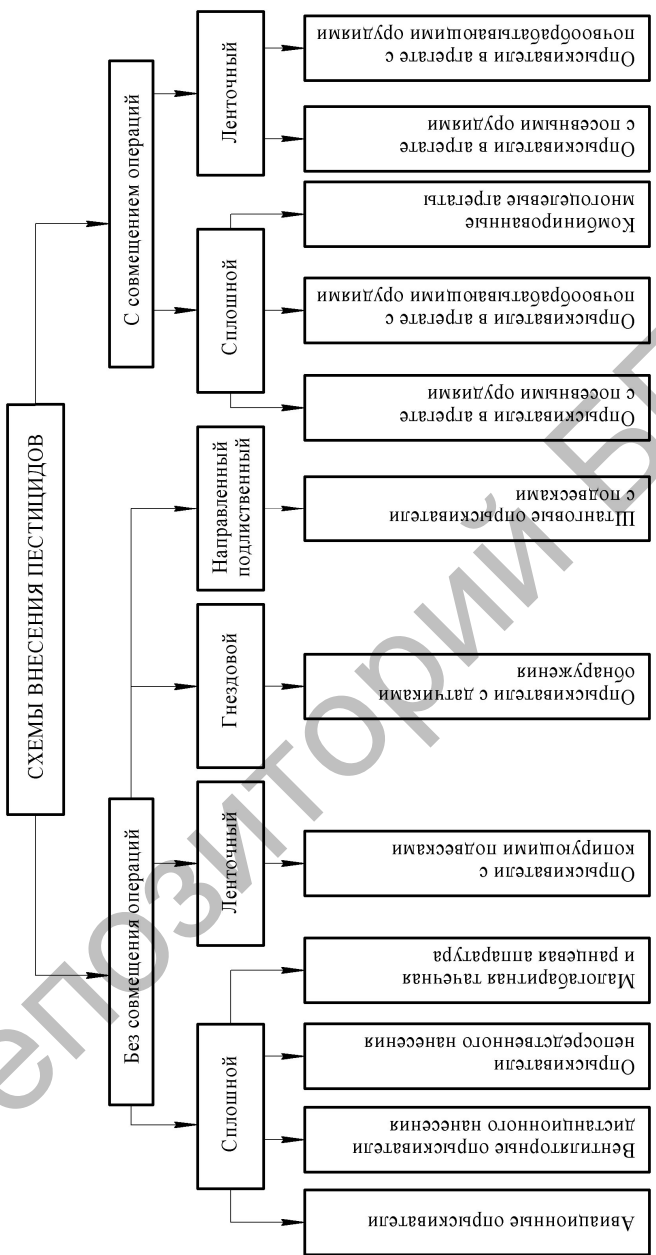


Рис. 1.3. Способы и устройства внесения пестицидов

1.3.1. Авиационное внесение пестицидов

Первые высказывания в печати о возможности применения авиации при внесении средств химизации в растениеводстве были в 1918 и 1920 гг., а первый полевой опыт опрыскивания был проведен в 1922 г. [4, 23]. Широкое практическое использование самолетов для внесения средств защиты растений было начато в 1925 г. Первыми серийно выпускаемыми для авиационно-химических работ (АХР) стали самолеты По-2 (У-2), выполненные в сельскохозяйственном варианте. В конце 40-х гг. прошлого века в сельскохозяйственном производстве началось использование самолетов Ан-2 и Як-12, в конце 50-х гг. – вертолетов Ми-1 и Ка-15.

Опрыскивание авиационным способом может проводиться растворами, а также суспензиями и эмульсиями, приготовленными из смачивающих порошков и эмульсионных концентратов. Для реализации данного способа применялись преимущественно самолеты Як-12, Ан-2, Ан-2М, «Авиатика» и вертолеты Ми-1, Ми-2, Ка-15, Ка-26 (рис. 1.4, а, б), оборудованные аппаратурой для опрыскивания, рассеивания сыпучих и жидких материалов, средств химизации, а также энтомофагов биологического метода защиты растений [4, 19, 23–32].

Отмеченные ранее недостатки использования самолетов и вертолетов при проведении авиационных химических обработок снижаются с применением сверхлегких летательных аппаратов (мотодельталетов), оснащенных оборудованием для малообъемного опрыскивания (рис. 1.4, в).



Рис. 1.4. Технические средства для авиационного внесения пестицидов:
а – самолет; б – вертолет; в – мотодельтале

Авиационная опрыскивающая техника нового класса позволяет обрабатывать посевы с высоты 1,5...3,0 м. Небольшой самолет может оснащаться малообъемным опрыскивателем, способным работать с дозировкой от 30 до 300 л·га⁻¹. Высота полета самолета над обрабатываемым участком составляет от 5 до 50 м в зависимости от вида выполняемых работ. При хорошей организации работ и соответствующих

метеорологических условиях дневная наработка на один самолет может составлять от 800 до 1200 га (при средней норме расхода рабочего раствора 25 л·га⁻¹) [4, 26].

Использование легкой авиации при опрыскивании сельскохозяйственных культур методом УМО выгодно отличается от классической авиации тем, что для взлета и посадки не требуются специально подготовленные площадки. Легкие самолеты, мотодельтапланы и мотодельтателеты способны работать с травяного покрытия, и, в отличие от наземных опрыскивателей, их работа не зависит от влажности почвы и высоты обрабатываемых растений, поэтому достигается экономия энергоресурсов и воды.

Мнения ученых и производителей по вопросу эффективности и безопасности применения средств защиты растений методом авиационного УМО противоречивы. Одни авторы полностью отрицают возможность применения этого метода [4, 33, 34]. Другие исследователи утверждают, что при соблюдении технологических регламентов применения авиации в сельском хозяйстве и санитарно-экологических нормативов при применении пестицидов эффективное использование этого метода при защите растений возможно и безопасно [23–26].

1.3.2. Наземное внесение пестицидов

Одним из самых распространенных и перспективных способов применения химических средств защиты растений от вредителей, болезней и сорняков является наземное внесение, выполняемое полевыми сельскохозяйственными опрыскивателями. Они классифицируются (рис. 1.5) по технологическому способу опрыскивания, способу нанесения распыленной жидкости на обрабатываемый объект и др. Анализ технологий дистанционного и авиационного опрыскиваний позволил установить, что при использовании таких опрыскивателей отмечаются высокая неравномерность распределения рабочего раствора пестицида (коэффициент вариации вентиляторных опрыскивателей – более 40 %, авиационных – в 2 раза выше) и значительные потери препарата (до 60 % – у вентиляторных и до 90 % – у авиационных опрыскивателей) из-за сноса ветром, поэтому предпочтение отдается наземным опрыскивателям (рис. 1.6), в частности штанговым [4, 19, 36].

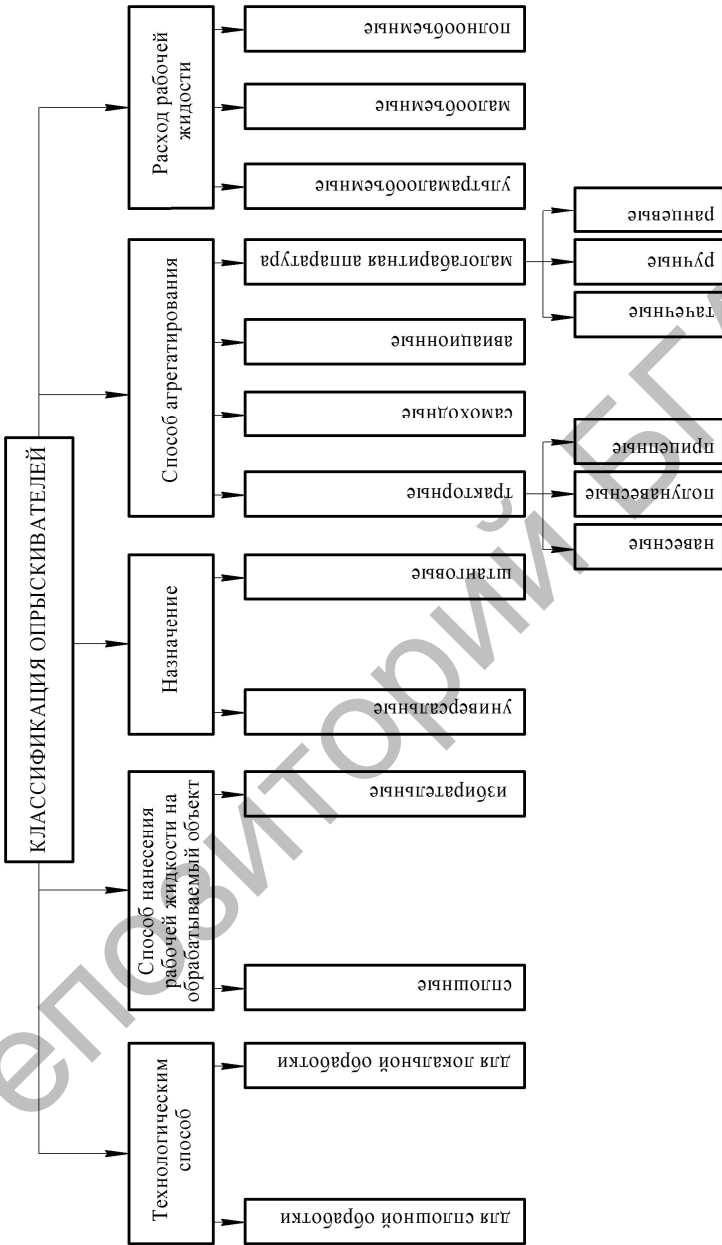


Рис. 1.5. Классификация опрыскивателей

Общая мировая тенденция производителей опрыскивающей аппаратуры направлена на повышение унификации и совершенствование узлов производимой продукции. В последние годы тракторные навесные и прицепные гидравлические опрыскиватели подверглись большим конструктивным и технологическим изменениям. Коллекторы полевых штанг начали снабжать надежными отсекателями, позволяющими исключить подтекание рабочего раствора из распылителей после прекращения подачи рабочего давления [4, 19, 36–38]. Для удобства и безопасности заправки резервуаров объемом свыше 600 л современные полевые опрыскиватели комплектуются специальными устройствами (миксерами) для приготовления рабочего раствора вне основного бака, что предусматривает экологически безопасную утилизацию неиспользованного раствора.



а

б

в

Рис. 1.6. Штанговые опрыскиватели для наземного внесения пестицидов: а – навесной; б – прицепной (полунавесные); в – самоходный

Существенные изменения претерпела система настройки и регулировки работы опрыскивателя. Она позволяет в случае нарушения технологического процесса отключать подачу жидкости в отдельные секции штанги, в автоматическом режиме поддерживать норму расхода жидкости при изменениях скорости движения опрыскивателя, что сказывается на повышении качества обработки и экологической безопасности. Штанги опрыскивателей снабжаются эффективной системой навески и стабилизации, позволяющей обеспечить надежность конструкции и качество выполняемого технологического процесса. Широко начала использоваться автоматика при вождении агрегата, контроле работы распылителей, при обеспечении постоянства расстояния между их выходными соплами и обрабатываемой поверхностью и пр.

Традиционные штанговые опрыскиватели также не удовлетворяют в полной мере требованиям, предъявляемым к опрыскивателям. Недостатки:

– высокая полидисперсность распыла (варьирование диаметров капель от 20 до 500 мкм);

– зависимость качества обработки от погодных условий: нельзя проводить опрыскивание при скорости ветра более $4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, а также в дневное время из-за восходящих потоков воздуха, обусловленных инверсией температуры, препятствующих осаждению капель рабочей жидкости, уносящих их за пределы обрабатываемых площадей и увеличивающих интенсивность их испарения [4, 6];

– неравномерная обработка вегетирующих растений (неравномерная обработка верхнего, среднего, нижнего ярусов, наружной (адаксиальной) и внутренней (абаксиальной) поверхности листьев, стеблей).

При норме расхода рабочей жидкости $200 \dots 300 \text{ л} \cdot \text{га}^{-1}$ на нижние ярусы растений препарат практически не попадает, оседая на верхних (более 80 %) [4, 6].

В настоящее время химические обработки проводятся широкозахватными штанговыми опрыскивателями как зарубежных фирм: *Hardi, Moteska, Holder, RAU Agrotechnic, Jacto, Jacoby, Tecnomat, Seguir, Evrard, Caruelle, Fertyl*, так и отечественного производства: ОАО «Мекосан», ОАО «Дятловская СХТ», ОАО «Ралл», ООО «Ремком», ОАО «Белама Плюс», ОАО «СелАгро» и др. В общем случае опрыскиватели состоят из следующих основных узлов: шасси, насос, всасывающая и нагнетательная магистрали, привод насоса, система очистки рабочей жидкости, емкость для рабочей жидкости, мешалка, контрольно-регулирующее оборудование, распределительная штанга с распылителями [4–7].

1.3.3. Общее устройство и принцип работы опрыскивателя

Опрыскиватель предназначен для обработки полевых культур пестицидами, а также для внесения жидких комплексных и других минеральных удобрений путем поверхностного опрыскивания.

Основными узлами опрыскивателя (рис. 1.7) являются регулятор давления 1, фильтр 2, основная емкость (бака) 3, штанга 5 с механизмами подъема и изменения угла наклона и распылителями 4, заправочное устройство 6, миксер 7, насос 8, рама 9. Штанги опрыскивателя, имеющие ширину захвата больше 15 м, дополнительно оборудуются механизмами стабилизации (гашения колебаний).

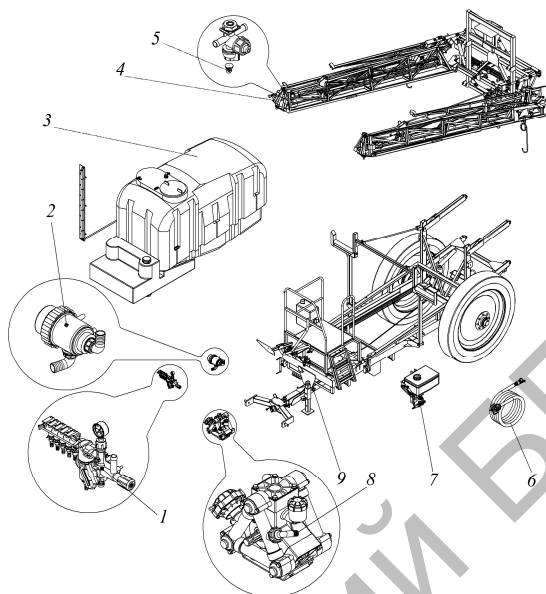


Рис. 1.7. Узлы штангового опрыскивателя [19]

Рама опрыскивателя установлена на колеса, колея которых регулируется бесступенчато.

Опрыскиватель должен быть оборудован стояночным и рабочим тормозом, а также светосигнальными устройствами.

Емкости опрыскивателя. Опрыскиватели могут оснащаться несколькими емкостями (баками) для используемых в работе жидкостей. К ним относятся:

- основная емкость (бак), содержащий воду для опрыскивания или рабочий раствор пестицидов (комплексных удобрений);
- дозаторная емкость (бак) для приготовления и безопасной подачи рабочего раствора в основную емкость опрыскивателя;
- промывочная емкость (бак), содержащий чистую воду для промывки внутренней части бака и коммуникаций после опрыскивания;
- емкость (бак) с чистой водой, используемой оператором для умывания.

Согласно стандартам Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО), опрыскиватели должны оснащаться емкостями: основной и с чистой водой для умывания.

Опрыскиватели с объемом рабочей жидкости 1000 л и более в обязательном порядке оснащаются дозаторной и промывочной емкостями.

Дозаторная емкость выполняется в виде резервуара, в который можно безопасно влить или поместить неразбавленные составы пестицидов.

Промывочная емкость предназначена для промывки чистой водой основной емкости и системы трубопроводов, содержащих пестицидные растворы. Она имеет объем не менее 10 % от объема основной емкости опрыскивателя.

Емкость для умывания и связанный с ней контур трубопроводов имеют конструкцию, полностью независимую от основных контуров опрыскивателя, содержащих химические растворы. Ее минимальный объем составляет, как правило, 5 л.

Основная емкость (бак) опрыскивателя (рис. 1.8) предназначена для приготовления, транспортировки и содержания рабочей жидкости в процессе работы машины. Она изготавливается из химически стойких пластмасс (полиэстера), стеклопластика или нержавеющей стали.

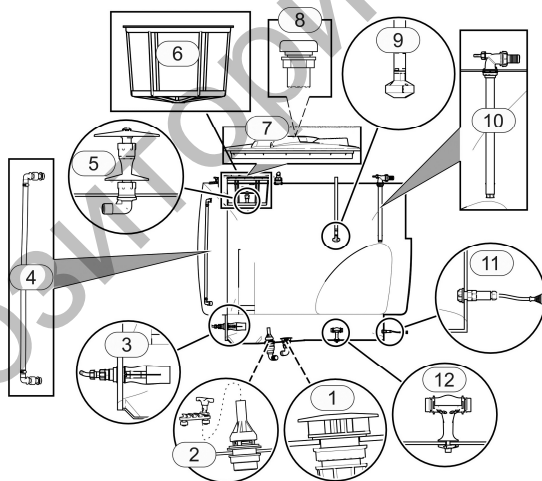


Рис. 1.8. Элементы основной емкости опрыскивателя [19]:

- 1 – антиворонка; 2 – противозагрязняющий сливной клапан; 3 – гидромешалка эжекторная; 4 – уровнемер; 5 – порошоквый смеситель; 6 – корзиный фильтр; 7 – крышка емкости; 8 – дыхательный клапан; 9 – сопло для промывки резервуаров;
- 10 – гидроэжектор; 11 – датчик уровня в баке электронный (датчик давления);
- 12 – донная мешалка-омыватель

Главными качествами емкости являются коррозионная стойкость к рабочим жидкостям и герметичность. В конструкциях современных опрыскивателей используются основные емкости, объем которых составляет от 200 до 3500 л и более. Широкое распространение получили емкости 600, 1200, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 л.

На боковой и передней поверхностях емкости установлен уровнемер для контроля уровня жидкости, находящейся в ней. В верхней части установлены горловина с фильтрующим элементом и форсункой для закладки пестицидов в виде порошка, концентрата или эмульсии и разбавления и смешивания с технологической жидкостью, и горловина с фильтрующим ситом для заполнения емкости технологической водой для приготовления рабочего раствора. В исключительных случаях опрыскиватели оборудуются отдельными системами контроля растворителя (воды) и концентрата пестицида.

Отверстия для заполнения емкостей диаметром более 400 мм или квадратной формы размером более 400×300 мм оснащаются сетками и герметично закрываются крышками с нефрикционной системой закрытия. Сетчатые фильтры в отверстиях выполняются с размером ячейки 1 мм.

Основная емкость оснащается устройством для безопасного сбора и слива рабочего раствора, оставшегося после выполнения технологического процесса. Данное устройство обеспечивает не более 1,5 % номинального объема бака, или 5 л раствора, оставшегося после слива.

Для исключения образования осадка во время транспортирования рабочей жидкости основная емкость оборудуется системой смешивания механического или гидравлического принципа действия. Гидравлический принцип основан на использовании гидромешалок в виде форсунок, расположенных в нижней части емкости.

Главным качеством бака является его коррозионная стойкость к рабочим растворам пестицидов и его герметичность.

Бак должен иметь уровнемер, отверстие для слива жидкости, заливную горловину. Дополнительно может комплектоваться антиворонкой, противозагрязняющим сливным клапаном, эжекторной гидромешалкой, гидравлическим смесителем порошков, корзиным фильтром, крышкой, распылителем для промывки бака, датчиком уровня, донной мешалкой-омывателем и др.

Антиворонка устанавливается в самой низкой точке емкости для максимального ее опустошения. Она имеет различные исполнения соединения с заборным патрубком и предназначена для предотвращения образования вихрей рабочей жидкости в баке над заборным патрубком.

Противозагрязняющий сливной клапан устанавливается на дне емкости, предназначен для слива жидкости и удаления осадка из бака. Он имеет различные конструктивные решения: сливной патрубок, встроенный в патрубок клапан со штоком и выполненный в виде клапана со шнурковым открытием.

Эжекторная гидромешалка служит для поддержания необходимой концентрации рабочего раствора и представляет собой эжектор, закрепленный в нижней части емкости. Для эффективного перемешивания рабочей жидкости производительность гидромешалки должна быть не менее 4 % от объема бака в минуту.

Уровнемер служит для контроля уровня жидкости в баке.

Гидравлический смеситель порошков предназначен для растворения сухих препаратов. Устанавливается в корзинном фильтре. Сухой препарат засыпается в корзинный фильтр, закрывается крышка горловины, жидкость подается на размыватель и растворяет порошок, раствор стекает в бак.

Корзинный фильтр предназначен для первичной очистки жидкости, заливаемой в бак, и представляет собой сетчатую корзину.

Крышка емкости предназначена для герметизации заливной горловины емкости. Бывает откидной или навертной.

Дыхательный клапан (лабиринтный или поплавковый) предназначен для предотвращения смятия бака в процессе его опустошения.

Распылитель для промывки бака предназначен для удаления загрязнений, а также остатков препаратов с его внутренних поверхностей.

Датчик уровня, установленный на дне бака (после выполнения должной автоматической калибровки на компьютере опрыскивателя), позволяет отображать уровень жидкости в емкости максимальной высотой 4 м.

Донная мешалка-омыватель позволяет предотвратить образование осадка на дне цистерны, перемешивания его струей, подающейся под давлением из распылителя. В результате ее работы вещества остаются во взвешенном состоянии.

Насосы, устанавливаемые на штанговых опрыскивателях, предназначены:

- для подачи жидкости к распыляющим устройствам;
- гидравлического перемешивания препаратов в баке опрыскивателя;
- заправки бака опрыскивателя водой и средствами защиты растений.

В зависимости от предназначения и технических особенностей в конструкциях штанговых опрыскивателей используются центробежные, поршневые, мембранные и мембранно-поршневые (сочетают характеристики двух предыдущих типов) насосы.

1. Центробежные насосы требуют повышенных оборотов привода, поэтому они соединены с валом отбора мощности через мультипликатор, который представляет собой повышающий шестеренный двухступенчатый редуктор, планетарный или ременный.

2. Поршневые, мембранные и мембранно-поршневые насосы имеют привод непосредственно от вала отбора мощности трактора, как правило, при оборотах 540 об·мин⁻¹. Насос мембранно-поршневого типа обеспечивает подачу жидкости под давлением к узлам распыла и гидромешалке. Он оборудован демпферной пневмокамерой для сглаживания пульсаций давления. Перед эксплуатацией насоса в демпферную камеру необходимо закачать воздух под давлением, указанным в паспорте на насос. Современные мембранно-поршневые насосы для полевых штанговых опрыскивателей имеют производительность до 400 л·мин⁻¹ и оснащены 2...6 поршнями (мембранами).

Заправочные устройства служат для заполнения бака опрыскивателя водой для приготовления рабочей жидкости.

Миксер служит для разбавления жидких препаратов, а также для растворения порошков и дальнейшего перемещения раствора в основной бак.

Регулятор давления обеспечивает ручную регулировку нормы вылива, в зависимости от давления в системе нагнетания, и распределение жидкости по секциям штанги опрыскивателя. Жидкость поступает от насоса к главному клапану, который направляет ее либо к штанге (штанга включена), либо на слив в бак (штанга выключена). Если штанга включена в работу, то жидкость поступает в общий коллектор нагнетания, где установлены пропорциональный клапан

и группа секционных клапанов. Пропорциональный клапан обеспечивает отвод части жидкости обратно в бак, регулируя тем самым давление жидкости в коллекторе. Каждый секционный клапан позволяет отключать из работы секцию штанги. Контроль давления в системе нагнетания осуществляется по манометру.

Фильтры. В состав гидрокommunikаций опрыскивателя входят, как минимум, три или четыре фильтра. Первый, расположенный в заливной горловине основной емкости, должен иметь размер ячеек сетки 700 мкм, второй фильтр располагается перед насосом и должен иметь размер ячеек 280 мкм. Третий фильтр обычно располагают после насоса перед регулятором давления или непосредственно на штангах, перед распылителями. Другие фильтры размещают перед распылителями (в корпусах распылителей); размер их ячеек должен быть согласован с типоразмером используемых распылителей. В соответствии с международным цветовым кодом они должны быть одинакового цвета.

Обычно используются фильтры с размером не менее 280 мкм. В некоторых опрыскивателях могут устанавливаться посекционные фильтры, располагающиеся на гидрокommunikациях после посекционного регулятора давления. Всасывающий фильтр устанавливается между баками (основным и промывочным) и насосом и служит для очистки рабочей смеси от посторонних механических примесей и нерастворенных химических веществ.

Распылители. Эффективность применения пестицидов зависит не только от технического состояния опрыскивателя, умелой его эксплуатации, но и от работы распылителей, которая определяет техническую, биологическую и экономическую эффективность проводимой химической обработки и эксплуатационные показатели сельскохозяйственной машины. Основная функция распылителя – дробление потока жидкости на капли заданных пределов дисперсности.

В зависимости от способа диспергирования жидкости распыливающие рабочие органы можно классифицировать на гидравлические, пневматические (газовые, воздушнoструйные), механические (ротационные), электрические, ультразвуковые, пульсационные, акустические с подводом энергии через газ и комбинированные.

При защите растений эффект, получаемый от опрыскивания, существенно зависит от размера капель, генерируемых распылителем. В зависимости от метода распыления жидкости, получают капли

различных классов дисперсности, различающиеся по диаметру, массе и объему (аэрозоли): термические – с диаметром капли по миделеву сечению ($d_k < 20$ мкм); механические ($d_k = 20...50$ мкм); мелкодисперсные ($d_k = 50...150$ мкм); среднелдисперсные ($d_k = 150...300$ мкм) и крупнодисперсные ($d_k > 300$ мкм) [4, 19].

В спектре факела гидравлических распылителей закрытого типа, при любых условиях распыла, присутствуют капли всех классов дисперсности (до 7,5 % капель диаметром 0...50 мкм; 85 % капель диаметром 50...150 мкм и 7,5 % капель диаметром более 150 мкм). Гидравлические распылители вследствие простоты конструкции и отсутствия использования дополнительного оборудования, усложняющего конструкцию агрегата, нашли широкое применение в полевых опрыскивателях. В гидравлических распылителях диспергирование происходит за счет кинетической энергии движущейся жидкости или энергии ее удара об отражательную поверхность. При этом энергоемкость распыливания составляет 2...4 кВт·т⁻¹ жидкости. В зависимости от принципа работы, они подразделяются на струйные (щелевые), центробежные и дефлекторные (рис. 1.9) [4, 7, 19].

При работе щелевых струйных распылителей (рис. 1.9, а) происходит образование неустойчивой плоской жидкой пленки, распадающейся на капли различных размеров. Струйные щелевые распылители являются наиболее универсальными, поскольку обеспечивают частично регулируемый, более тонкий распыл рабочей жидкости, пригодный для внесения всех видов пестицидов. Вторым их преимуществом является более равномерное распределение рабочей жидкости по ширине конуса распыла. В настоящее время щелевые распылители применяются наиболее широко.

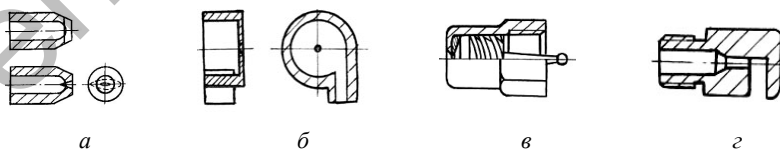


Рис. 1.9. Виды гидравлических распылителей:
 а – струйный, б – центробежный без завихрителя (тангенциальный);
 в – центробежный с завихрителем, з – дефлекторный




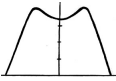

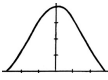


В плоскоструйных (щелевых) распылителях рабочая жидкость формируется в виде веерообразной струи, которая затем, сужаясь, дробится на капли. В зависимости от конструкции распылителя, образуется факел распыла с углом при вершине 80, 110, 120°, который постепенно расширяется от сопла, поэтому оптимальная высота установки распылителей над обрабатываемой поверхностью колеблется от 0,5 до 0,7 м. Двойные плоскофакельные распылители обеспечивают проникновение жидкости в толщу листьев и создают в сравнении с другими распылителями более мелкие капли. Плоскоструйные распылители имеют один существенный недостаток – небольшой размер выходного сопла, что требует предельно тщательной очистки рабочего раствора, постоянного контроля работы распылителей.

С данной точки зрения, наиболее рациональным является использование центробежных и дефлекторных распылителей, у которых размеры выходных сопел большие. Кроме того, неравномерность распределения препарата по ширине захвата полевых опрыскивателей, укомплектованных щелевыми распылителями, достигает 40...50 % , а укомплектованных центробежными распылителями – 20...40 % .

В центробежных распылителях (см. рис. 1.9, б, в) жидкость под углом подается в камеру закручивания, имеющую цилиндрическую форму, и начинает вращаться по периферии камеры. Вследствие этого жидкость проходит через сопло пустотелой струей, которая, расширяясь, образует полый конус, состоящий из тонкой пленки у входа, распадающейся затем на мелкие капли, величина которых зависит от интенсивности завихрения перед соплом и размеров камеры закручивания. В зависимости от способа закручивания, используют центробежные распылители с завихряющим сердечником и без него (см. рис. 1.9, б, в). В дефлекторных распылителях (см. рис. 1.9, г) струя жидкости, ударяясь в наклонную отражательную поверхность, принимает веерообразную форму и затем, уменьшаясь, дробится на капли.

Проведем анализ наиболее часто используемых при опрыскивании полевых культур гидравлических распылителей: центробежного, центробежно-струйного, щелевого и дефлекторного. Основные характеристики распылителей приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Характеристика гидравлических распылителей [4]

Тип распылителя	Характеристика распылителей				
	Область применения	Факел распыла	Размер капель, мкм	Рекомендуемый угол факела распыла	Эпоха распределения жидкости по факелу распыла
Центробежный (вихревой)	Обработка полевых культур инсектицидами и фунгицидами		мелкие (50...150)	80°	
Центробежно-струйный	Сплошное поверхностное внесение гербицидов с одновременной их заделкой в почву		средние (150...300) и крупные (свыше 300)	80°	
Щелевой	Довсходовая и послевсходовая обработка гербицидами, фунгицидами, инсектицидами		мелкие (50...150), средние (150...300) и крупные (свыше 300)	110°	
Дефлекторный	Внесение почвенных гербицидов и жидких минеральных удобрений		крупные (свыше 300)	120...170°	

Многочисленные опыты показали, что наиболее высокое качество покрытия поверхности достигается при распыливании рабочей жидкости на капли размером 50...250 мкм [4, 19].

Чем мельче капли, тем меньший расход жидкости необходим для получения минимальной плотности перекрытия. Кроме того, мелкие капли обладают лучшей проникающей способностью, чем крупные, которые, имея прямолинейную траекторию, сталкиваются с препятствием, находящимся на их пути, дробятся при ударе на более мелкие и оседают на поверхности. Возможен случай, когда крупные капли, не имея запаса кинетической энергии, при ударе о поверхность не дробятся, а скатываются с нее. Мелкие капли, имея меньшую кинетическую энергию, вместе с воздушным потоком обтекают листья и проникают внутрь растительного массива.

Несмотря на преимущества (простота конструкции, возможность комплектования широкозахватных агрегатов, опрыскивание с большим диапазоном расхода рабочей жидкости), гидравлические распылители имеют и существенные недостатки: 1) небольшие выходные отверстия, требующие тщательной очистки жидкости, 2) зависимость дисперсности распыла от давления в напорной магистрали, следовательно, расхода жидкости; 3) затрудненность получения монодисперсного распыла, так как в спектре факела присутствуют капли всех классов дисперсности. Кроме того, при использовании гидравлических распылителей при максимально допустимой агротехникой скорости ветра снос препарата достигает 80 %.

Эти недостатки устраняются использованием пневматических, ротационных, электрических, ультразвуковых и комбинированных распылителей, в которых изменение диаметра капель в факеле распыла происходит при постоянном давлении в жидкостной магистрали.

В настоящее время широкое распространение получили инжекторные распылители (рис. 1.10), состоящие из корпуса и вставленного в него эжектора, работа которых основана на принципе *Ventury*.

Принцип работы распылителя заключается в том, что рабочий раствор пестицида поступает в инжектор через калиброванное отверстие. Его диаметр определяет производительность распылителя. Инжектор имеет радиально расположенные отверстия в зоне самого узкого сечения канала. Рабочая жидкость, проходя это сечение на высокой скорости, создает разрежение, что вызывает подсос воздуха через каналы в корпусе распылителя. Диаметр канала инжектора постепенно увеличивается, жидкость в нем смешивается

с воздухом и поступает в корпус распылителя. Сопло корпуса имеет щелевидную форму и обеспечивает формирование факела распыла в виде плоского веера с необходимым углом при вершине.

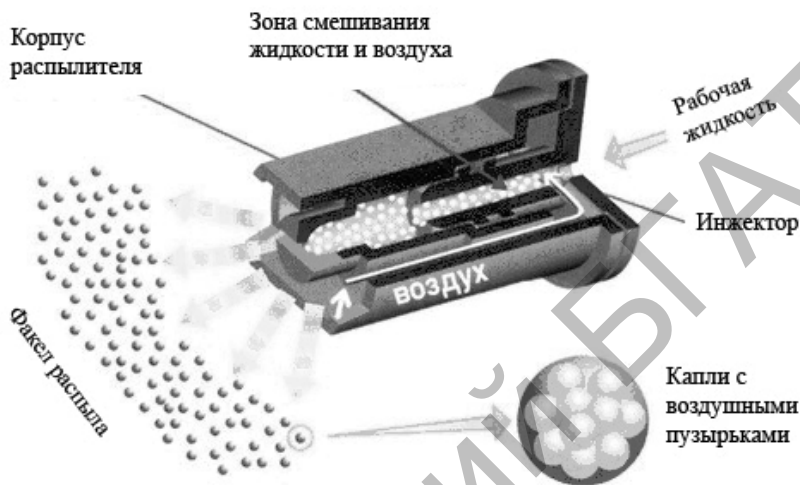


Рис. 1.10. Принцип работы инжекторных распылителей

Выходящая из сопла жидкость дробится на достаточно крупные, но относительно легкие капли, которые хорошо удерживаются на поверхности растений.

Количество капель диаметром менее 100 мкм снижено на 90 % в сравнении со стандартными щелевыми распылителями, что обеспечивает возможность применения опрыскивателей при скорости ветра до $8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ без риска сноса капель ветром.

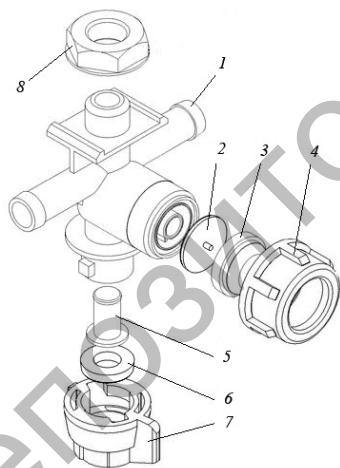
При использовании данных распылителей в процессе образования капель в них добавляются пузырьки воздуха, что приводит к увеличению размеров. Такие капли меньше подвержены сносу. При соударении с обрабатываемой поверхностью капли распадаются на более мелкие и полностью ее покрывают. При этом исключаются потери пестицидов вследствие скатывания больших капель с обрабатываемой поверхности листьев. При использовании данного типа распылителей мелких капель (менее 80 мкм) в факеле распыла практически не бывает.

Режимы работы и конструкции распылителей позволяют получать соответствующие параметры факела распыла, которые для различных видов обработок определяются агротехническими требованиями.

Устройство отсечное мембранное (корпус распылителя) предназначено для оснащения опрыскивателей полевых штанговых с целью осуществления крепления распылителя, фильтрации и предотвращения вылива рабочей жидкости из коллектора штанги после отключения привода насоса (рис. 1.11, а).

В стандартном исполнении опрыскиватель комплектуется корпусами с одним распылителем, клапаном-отсекателем (противокапельный клапан, или отсечное устройство) и фильтрующим элементом. Дополнительно могут устанавливаться корпуса на 2, 3, 4 и 5 распылителей различных типов и размеров (рис. 1.11, б).

Клапан-отсекатель обеспечивает перекрытие подвода рабочей жидкости к распылителю при падении давления в напорной магистрали ниже 0,07 МПа.



а

б

Рис. 1.11. Устройство отсечное мембранное:

а – с одним распылителем (в разобранном виде); б – с тремя распылителями (в сборе); 1 – корпус; 2 – мембрана; 3 – клапан отсечный; 4 – гайка накидная; 5 – фильтр индивидуальный; 6 – кольцо уплотнительное; 7 – гайка байонетная; 8 – гайка крепления

Штанги. Важнейшим узлом в штанговых опрыскивателях, который, в основном, определяет производительность и качество обработки, является *штанга*. Она состоит из несущей конструкции, системы навешивания (подвески), рамы-держателя, механизмов регулировки высоты и угла наклона, механизмов складывания-раскладывания. Обычно несущая конструкция штанг выполнена в виде пространственной фермы, имеющей 3, 5, 7 или 9 секций, соединенных между собой посредством шарниров и оснащенной механизмами фиксации в рабочем положении. Перевод штанг из транспортного положения в рабочее (и наоборот) осуществляется вручную или гидравлическим способом. Штанги с ручным управлением обычно имеют длину до 24 м, штанги с гидравлическим управлением – до 54 м. В последнее время многие производители работают над проблемой уменьшения массы штанги, изготавливая их несущие конструкции в виде плоской фермы или консольной трубы.

Штанги опрыскивателей бывают легкие (рис. 1.12) и усиленные (рис. 1.13) [36, 38]. Легкие штанги (удилища) представляют собой простую конструкцию, однако имеют небольшую ширину захвата. Обычно они состоят из центральной и двух крайних секций, закрепленных при помощи простых шарниров и демпфирующих элементов на раме опрыскивателя. Крайние секции имеют тросовую поддерживающую систему. Ширина захвата таких штанг колеблется от 5 до 12 м, масса – от 28 до 10 кг. Приведенная материалоемкость на 1 м конструктивной длины составляет $5,40 \dots 8,75 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1}$.

Усиленные конструкции представляют собой пространственную конструкцию, которая вместе с элементами систем подачи, распыления рабочей жидкости и системой стабилизации имеет значительную массу. Так, масса штанги с шириной захвата 22,5 м может составить до 750 кг [38].

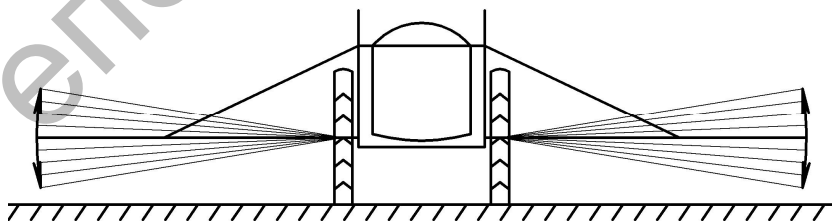


Рис. 1.12. Схема легкой штанги

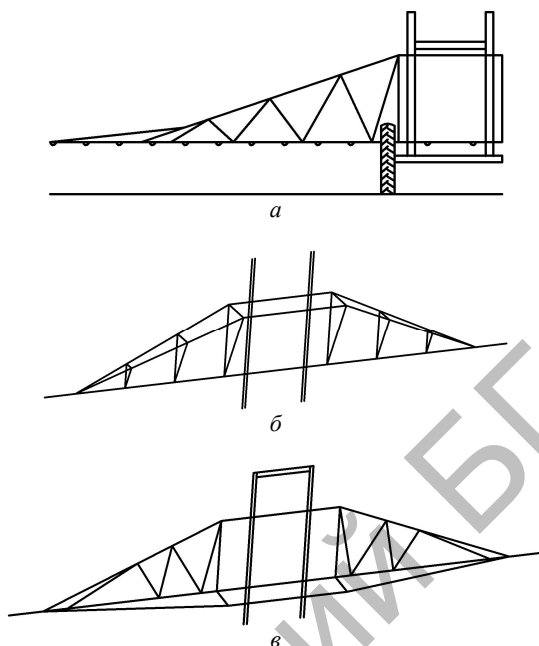


Рис. 1.13. Схемы усиленных плоской (а) и пространственной (б, в) штанг

С увеличением ширины захвата осуществляется переход выполнения несущих конструкций штанг по схеме «удилище»→«плоская ферма» (рис. 1.13, а)→«пространственная ферма» (рис. 1.13, б, в) [36].

Ширина захвата усиленных плоских штанг, выполненных по типу «плоская ферма», колеблется от 9 до 37 м, при этом масса составляет 50...750 кг. Приведенная материалоемкость составляет $5,5...27,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1}$ [36]. При увеличении длины данного типа штанги свыше 21 м ухудшается качество опрыскивания из-за усиления ее колебаний, поэтому в таких случаях используют несущую конструкцию усиленных пространственных штанг, выполненных по типу «пространственная ферма». Ширина их захвата колеблется от 18 до 36 м, а масса достигает 1000–1500 кг. Материалоемкость составляет $35...47 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1}$ [36].

Следует отметить, что усиленные пространственные штанги из-за большей массы предъявляют повышенные требования к системам стабилизации.

В зависимости от ширины захвата штанги бывают многосекционными. Легкая штанга обычно имеет три (центральная, две крайние) секции, усиленная плоская и пространственная – до семи (центральная, четыре промежуточные, две крайние). Крайние секции обычно имеют возможность отклоняться в горизонтальной (в направлении движения агрегата) либо вертикальной плоскостях, и на их краях устанавливаются предохранительные механизмы, предотвращающие поломку штанги и повреждение распылителей при соприкосновении ее концов с почвой или препятствием.

В транспортном положении (рис. 1.14, а) штанги складываются вдоль либо сзади основной емкости в горизонтальной, наклонной или вертикальной плоскостях, а в рабочем (рис. 1.14, б, в) – устанавливаются сзади перпендикулярно направлению движения агрегата.



Рис. 1.14. Положение штанги в транспортном (а) и рабочем (б) положениях

Для складывания-раскладывания штанг используются различные системы, позволяющие осуществлять данные процессы вручную, при помощи гидроцилиндров или комбинированным способом: центральные секции складываются-раскладываются при помощи гидроцилиндров, а крайние – вручную.

Ручной способ может применяться на легких или усиленных плоских штангах.

Схемы складывания штанг в горизонтальной и наклонной плоскостях с двух сторон основной емкости в направлении движения агрегата наиболее простые.

Для этих целей используются жесткие тяги, тросы, цепи. Различное их сочетание позволяет складывать и раскладывать 5-секционную штангу при помощи двух гидроцилиндров.

Причем жесткие тяги могут выступать в роли упоров при гашении колебаний боковых частей штанги в горизонтальной плоскости.

Для реализации схем складывания штанг в вертикальной плоскости необходимо установить на каждой секции собственный гидроцилиндр, что усложняет конструкцию и массу штанги.

Данная схема обеспечивает наибольшую жесткость и лучшую плавность хода штанги, позволяет варьировать ширину захвата и копировать сложный рельеф полей [36].

Элементы системы точного земледелия

Системы автоматизированного управления (рис. 1.15) и контроля выполнения технологического процесса представляют собой набор электромеханических устройств, которые обеспечивают выполнение технологического процесса в автоматическом режиме.

Информация с датчиков считывается и обрабатывается компьютером, который затем отправляет команды на исполнительные органы, поддерживая заданную норму вылива на гектар.

Основным отличием и преимуществом систем автоматизированного управления расходом жидкости является автоматическое поддержание заданной нормы внесения рабочей жидкости на гектар при изменении скорости движения опрыскивателя.

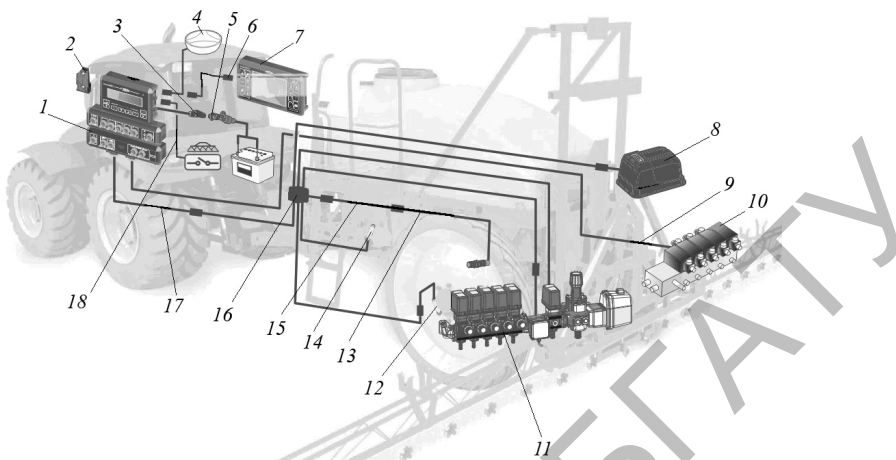


Рис. 1.15. Схема системы автоматизированного управления и контроля выполнения технологического процесса:

1 – блок автоматизированного управления (компьютер); 2 – кронштейн крепления блока управления; 3 – кабель питания; 4 – антенна GPS/DGPS; 5 – розетка питания от аккумулятора; 6 – кабель соединительный; 7 – навигатор-курсоуказатель; 8 – пенный маркер; 9 – кабель управления гидрораспределителем штанги; 10 – гидрораспределитель штанги; 11 – исполнительные устройства (клапана управления процессом) 12 – датчик давления; 13 – датчик скорости; 14 – датчик оборотов насоса (ВОМ); 15 – удлинитель кабеля датчика скорости; 16 – кабель управления; 17 – удлинитель кабеля управления; 18 – педаль ножная

Исполнительные механизмы системы (рис. 1.16) предусматривают наличие главного 1, пропорционального 3 и секционных 6 клапанов, расходомера 5, фильтра линии нагнетания 4 и манометра 7.

Скорость движения опрыскивателя измеряется специальным датчиком, и информация передается на компьютер.

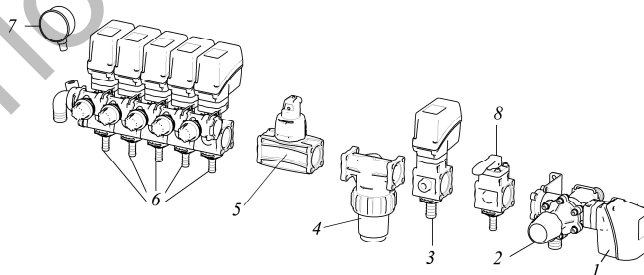


Рис. 1.16. Блок регулирования и распределения жидкости

Главный клапан 1 направляет поток жидкости либо в блок регулирования, либо на слив в бак (имеет два положения: «Открыто» и «Закрыто»). Главные клапаны бывают с ручным рычажным включением или с электромеханическим приводом.

Предохранительный клапан 2 регулирует максимальное давление в системе. Обычно главный и предохранительный клапаны выполнены в общем корпусе. Пропорциональный клапан 3 регулирует количество жидкости, подаваемое на штангу, перенаправляя часть потока на слив в бак.

Фильтр 4 очищает жидкость, нагнетаемую в гидравлические секции. Расходомер 5 предназначен для измерения количества жидкости, потребляемого штангой. По принципу работы расходомеры бывают лопастные и электромагнитные.

Секционные клапаны 6 служат для отключения подачи жидкости в распыливающие устройства секций штанги опрыскивателя.

Манометр не является обязательным элементом системы, поскольку вся необходимая информация выводится на дисплей компьютера. Однако его наличие позволяет обеспечить работоспособность опрыскивателя в случае выхода из строя компьютера.

Управление технологическим процессом осуществляется компьютером, расположенным в кабине трактора. Компьютер обеспечивает настройку параметров технологического процесса и автоматическое их поддержание. Источником данных для компьютера являются расходомер (входит в состав блока 8) и датчик скорости, установленный на несущей балке у левого колеса.

Компьютер *Teejet 844-E* (рис. 1.17) и комплект оборудования для опрыскивателей предназначен для регулировки количества жидкости, подаваемой на штангу опрыскивателя, за счет изменения давления в системе нагнетания.

В состав комплекта оборудования входит датчик скорости индуктивного типа, расходомер, фильтр линии нагнетания, секция регулировки давления, главный клапан, предохранительный клапан, блок клапанов управления секциями штанги.

Все исполнительные механизмы имеют электрический привод и управляются компьютером *Teejet 844-E*, располагаемым в кабине трактора. Компьютер обеспечивает автоматическое поддержание нормы внесения рабочей жидкости при изменении скорости движения опрыскивателя. Оператор имеет возможность управлять нормой

внесения, а также получать информацию о следующих технологических параметрах: скорость движения опрыскивателя ($\text{км}\cdot\text{ч}^{-1}$), норма внесения рабочей жидкости ($\text{л}\cdot\text{га}^{-1}$), обработанная площадь данного поля (га), количество внесенной рабочей жидкости на данное поле (л), давление в системе (расчетный показатель – бар).

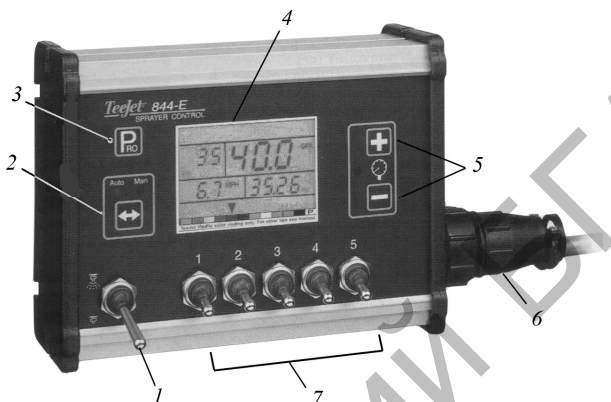


Рис. 1.17. Компьютер Teejet 844-E:

1 – тумблер управления главным клапаном; 2 – кнопка управления режимом работы опрыскивателя; 3 – кнопка режима «Программирование»; 4 – тумблеры управления секционными клапанами; 5 – кнопки изменения параметров; 6 – разъем подключения электропитания; 7 – дисплей

Данная информация хранится в памяти компьютера после его отключения.

Компьютерный блок (рис. 1.18) – электронная система контроля и регулирования нормы расхода рабочей жидкости, предназначенная для автоматизированного регулирования и соблюдения нормы расхода на единицу площади. Он полностью обеспечивает автоматическую поддержку ранее уставленной нормы расхода жидкости независимо от скорости движения агрегата и позволяет оператору контролировать все основные параметры опрыскивания, выключать подачу рабочей жидкости к штанге и при необходимости отключать отдельные секции штанги. Блок оборудован акустическим сигналом, который предупреждает о возникновении отклонений в работе.



Рис. 1.18. Компьютерный блок:
1 – монитор; 2 – блок управления клапанами секций штанги

На мониторе отображаются все параметры работы опрыскивателя: рабочая скорость ($\text{км}\cdot\text{ч}^{-1}$), расход рабочей жидкости ($\text{л}\cdot\text{га}^{-1}$), тип распылителей, обработанная площадь (га), путь, пройденный агрегатом (км), время работы (ч), общий расход рабочей жидкости (л), напряжение аккумулятора (В), рабочее давление в системе (Па), скорость потока рабочей жидкости ($\text{л}\cdot\text{мин}^{-1}$).

Курсоуказатель для параллельного вождения (рис. 1.19) состоит из монитора 1, GPS-антенны 2, проводов 3. Курсоуказатель позволяет работать с оборудованием различной рабочей ширины без перекрытий и огрехов, что дает возможность выполнять технологические операции в темное время суток или в условиях плохой видимости.

Высокая точность системы позволяет использовать ее при проведении всех полевых работ: опрыскивание, внесение удобрений и средств защиты растений, посев и т. д. Система обладает номинальной точностью – 30 см.



Рис. 1.19. Курсоуказатель для параллельного вождения:
1 – монитор; 2 – GPS-антенна; 3 – провода

Дополнительные возможности системы приведены на рис. 1.20, 1.21.

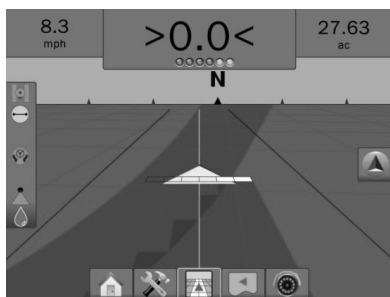


Рис. 1.20. Работа опрыскивателя с включенным блоком BoomPilot (ABSC): поочередно выключаются секции опрыскивателя при пересечении ранее обработанного участка



Рис. 1.21. Пример работы функции «Монитор размера капель». Данные навигатор получает от установленного в опрыскивателе датчика давления на шине CAN

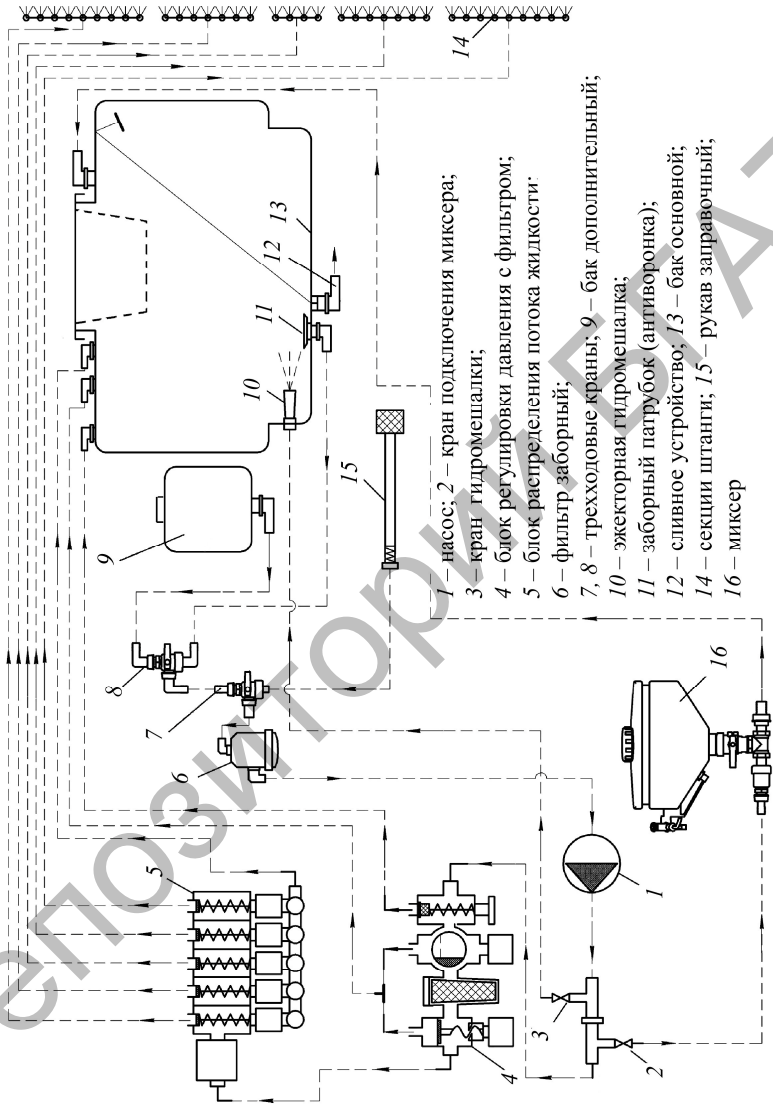
Принцип работы опрыскивателя

Несмотря на многообразие конструкций опрыскивателей, они выполнены по единой принципиальной схеме, предусматривающей последовательность следующих технологических операций: дозирование ядохимиката, распыливание его на мелкие частицы и транспортирование частиц ядохимиката на объект обработки.

При включении ВОМ трактора поток мощности передается на вал насоса 1 (рис. 1.22). Жидкость из основного бака засасывается через патрубок 11, проходит через фильтр 6 и поступает в насос.

При промывке системы жидкость поступает из дополнительного бака 9. Выбор режима работы осуществляется поворотом рукояток трехходовых кранов 7 и 8.

Поток жидкости под давлением можно разделить на три направления: к блоку управления 4, миксеру 16 через кран 2 и к гидромешалке через кран 3. Блок управления 4 устанавливает в системе нагнетания давление, обеспечивающее внесение необходимого количества рабочей жидкости на гектар при текущей скорости опрыскивателя. Скорость опрыскивателя рассчитывает компьютер по данным индуктивного датчика, установленного за левым (по ходу) колесом опрыскивателя.



- 1 – насос; 2 – кран подключения миксера;
- 3 – кран гидромешалки;
- 4 – блок регулировки давления с фильтром;
- 5 – блок распределения потока жидкости;
- 6 – фильтр;
- 7, 8 – трехходовые краны; 9 – бак дополнительный;
- 10 – эжекторная гидромешалка;
- 11 – заборный патрубок (антиворонка);
- 12 – сливное устройство; 13 – бак основной;
- 14 – секции шланги; 15 – рукав заправочный;
- 16 – миксер

Рис. 1.22. Гидравлическая схема опрыскивателя ОП-2500-24(Т)

Сопоставляя данные по скорости движения и количеству жидкости, идущей на штангу, компьютер рассчитывает текущий объем рабочей жидкости, вносимой на гектар. При отклонении фактической нормы внесения от заданной, компьютер автоматически изменяет давление в системе нагнетания и восстанавливает требуемое значение.

После блока регулировки давления жидкость поступает к блоку распределения 5, где каждая секция обеспечивает запитку секций 14 штанги. Узел распыла состоит из отсечного устройства с индивидуальным фильтром и распылителя, который фиксируется с помощью байонетной гайки. Отсечное устройство обеспечивает отсутствие подтекания жидкости из коллектора линии нагнетания при отключенном приводе насоса. Индивидуальный фильтр предотвращает засорение распылителей.

Распылители дробят рабочую жидкость на капли оптимального размера и равномерно распределяют ее вдоль штанги опрыскивателя. На опрыскивателе используются плоскофакельные целевые распылители различной производительности, обеспечивающие качественное применение любых типов пестицидов.

При включении в работу гидромешалки 10, жидкость поступает под давлением в ее эжектор и увлекает за собой жидкость, находящуюся в баке. Суммарный объем жидкости, проходящей через гидромешалку за одну минуту, составляет не менее 10 % объема основного бака. Наиболее эффективное перемешивание жидкости достигается при давлении в системе нагнетания не менее 0,5 МПа.

Для самозаправки опрыскивателя используется заправочный рукав 15, оборудованный заборным фильтром и обратным клапаном. Для самозаправки опрыскивателя рукав 15 необходимо присоединить к крану 7.

1.4. Потери пестицидов при опрыскивании и способы их уменьшения

В зависимости от характера влияющих факторов, все потери при внесении средств защиты растений можно разделить на производственные (человеческий фактор) и непроизводственные (обусловлены конструкцией сельскохозяйственной машины). При использовании различных технологий применения пестицидов

наблюдаются технологические потери части препарата. По различным данным, величина потерь может составлять от 15 до 50 % [2].

При работе сельскохозяйственных опрыскивателей могут возникнуть ситуации, приводящие к потере пестицидов: испарение мелких капель; скатывание с обрабатываемой поверхности крупных капель; огрехи и перекрытия соседних проходов; снос препаратов ветром; неравномерность распределения рабочей жидкости вдоль линии движения опрыскивателя и по ширине штанги опрыскивателя [1, 2, 4, 19].

Степень влияния каждого из перечисленных факторов определяется физико-механическими свойствами распыляемого препарата (вязкость, поверхностное натяжение, концентрация и др.), биологическими особенностями объекта обработки, а также аэродинамическим состоянием окружающей среды в момент обработки.

1.4.1. Испарение мелких капель

Испарение капель в условиях полевого опрыскивания – сложный физический процесс. Он происходит на трех этапах полета капель: 1) при формировании факела распыленной жидкости; 2) при падении и осаждении на объект; 3) во время нахождения на поверхности обрабатываемого объекта. Первый и третий этапы характерны для опрыскивателей любых типов. Второй этап – только для опрыскивателей, работающих методом волн. При тонком распыле процесс испарения идет значительно быстрее, чем при крупном, так как меньшие капли обладают большей удельной поверхностью. Стандартных, рекомендованных для практики, методов расчета испарения капель пестицида не существует. Слишком мелкие капли, испаряясь и превращаясь в сухие микроостатки пестицида, всегда либо угнетают растения, либо распространяются в биосфере, загрязняя окружающую среду. Расчеты показывают, что испарением капель водных препаратов, генерируемых гидравлическим опрыскивателем с поперечной штангой и распылителями, направленными вниз, во время пребывания их в воздухе можно пренебречь [4].

На испарение влияют температура и влажность воздуха, а также высота установки распылителя по отношению к обрабатываемому объекту (табл. 1.2).

Таблица 1.2. Продолжительность жизни капель различного диаметра и пройденный ими путь в зависимости от температуры и влажности воздуха [39]

Диаметр капель, мкм	Температура +20 °С, влажность 80 %		Температура +30 °С, влажность 50 %	
	Продолжительность жизни, с	Пройденный путь, м	Продолжительность жизни, с	Пройденный путь, м
50	14	0,5	4	0,15
100	57	8,5	16	2,4
200	227	136,5	65	39,0

При типичных условиях работы опрыскивателей (скорость ветра $2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, высота установки штанги 0,5 м, относительная влажность воздуха 65 %, температура воздуха +20 °С) до 30...40 % капель достигают объекта обработки [1].

Расчетная величина потерь капель размером до 120 мкм от испарения составляет: 40 % – для авиационных, 19 – для вентиляторных и 4 % – для штанговых опрыскивателей [2].

Сократить потери от испарения капель рабочего раствора пестицидов можно, выбирая оптимальные погодные условия для проведения обработок: повышенная влажность воздуха, его невысокая температура и отсутствие ветра.

1.4.2. Скатывание крупных капель с обрабатываемой поверхности

Соударение капель с поверхностью листьев растений – сложный и малоизученный процесс, который определяется размером и скоростью движения капель, физико-механическими свойствами жидкости и обрабатываемого объекта, его состоянием. В результате соударения капли могут распадаться на более мелкие, прилипать к поверхности объекта, отскакивать или скатываться. Многочисленными экспериментами установлено, что потери вероятны (в определенных условиях) при размере капель более 300 мкм, а наиболее подвержены скатыванию капли диаметром более 600 мкм. [2].

Для обеспечения эффективного опрыскивания необходимо создать условия полного прилипания 100 % капель, осевших на обрабатываемую поверхность. Этот процесс успешно регулируется

с помощью разнообразных поверхностно-активных веществ (ПАВ). При взаимодействии с поверхностью растений капли раствора с ПАВ действуют как смачивающие вещества, увеличивая площадь контакта между каплей и листовой поверхностью. Придавая водным растворам пестицидов некоторые свойства масел, ПАВ и эмульгаторы значительно понижают поверхностное и межфазовое натяжение, повышают способность раствора смачивать обрабатываемые поверхности и помогают вступить в контакт с водной фазой листа. Наибольшее снижение поверхностного натяжения водных растворов обеспечивается при концентрациях ПАВ в пределах 0,01...0,10 %. Растворы пестицидов с ПАВ эффективны в том случае, если они достигнут поверхности объекта обработки. Это возможно только при проведении опрыскивания в стабильную безветренную погоду.

Использование инжекторных распылителей (см. рис. 1.10) также позволяет решить проблему скатывания капель больших размеров с поверхностей обрабатываемых растений. В распылителях данного типа в жидкость, идущую по каналу, подсасывается воздух, и действует так называемый принцип *Venturi*. В результате создается низкократная пена, капли которой имеют внутри пузырьки воздуха. Это позволяет увеличить размер капель при той же массе жидкости. При соударении с обрабатываемой поверхностью капли не скатываются с листа, а распадаются на более мелкие, эффективно покрывая обрабатываемую поверхность.

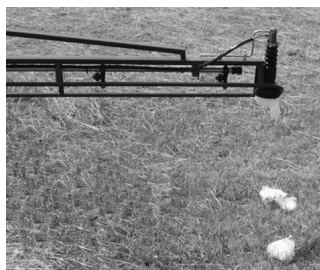
1.4.3. Огрехи и перекрытия соседних проходов

При движении опрыскивателя без технологической колеи могут возникнуть огрехи или перекрытия соседних проходов. Огрехи приводят к появлению необработанных участков, перекрытия – участков с двойной дозой внесенных препаратов. Это может быть связано с недостаточным контролем со стороны механизатора или с невозможностью визуального контроля границ обрабатываемого участка.

Исключить или снизить вероятность возникновения огрехов и зон перекрытия можно, применив курсоуказатели (см. рис. 1.19, 1.20) или следоуказатели (маркеры) (рис. 1.23).



a



б

Рис. 1.23. Пенный маркер штангового опрыскивателя [40]

Существуют механические, радиометрические, оптические, пенные маркеры, последние из которых находят широкое применение в растениеводстве. Пенный маркер (рис. 1.23, *a*) состоит из пеногенератора; насоса, подающего жидкость с пенообразователем; насоса, подающего воздух; емкости для хранения жидкости с пенообразователем и пульта управления.

Пеногенератор устанавливается на конце крайней секции штанги, формирует безвредную для растений пену (рис. 1.23, *б*), которая наносится на обрабатываемую поверхность на расстоянии от 3 до 10 м и может сохраняться, в зависимости от погодных условий, на протяжении 10–15 мин. Пена безвредна для растений.

Применение маркерных устройств экономически эффективно, если ширина захвата больше 10 м.

1.4.4. Снос препаратов ветром

Состояние стабильности приземного атмосферного слоя оказывает влияние не только на процент эффективного использования препарата, но и на снос частиц распыленного препарата за пределы обрабатываемой площади. Аэродинамическим состоянием воздуха определяются не только процент целевого использования пестицидов, но и снос распыленного раствора за пределы обрабатываемой площади. Снос рабочего раствора пестицидов – это «доля расходо-ванного количества раствора, который во время опрыскивания горизонтальными или вертикальными атмосферными воздушными потоками сносится с обрабатываемой площади и оседает вне ее

или переносится во взвешенном состоянии на большие расстояния (доля атмосферного сноса)» [1].

При скорости движения опрыскивателя $8 \text{ км} \cdot \text{ч}^{-1}$ на капли действует воздушный поток скоростью $2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, а при скорости опрыскивателя $30 \text{ км} \cdot \text{ч}^{-1} - 8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ [41].

В Беларуси наблюдения за режимом ветров ведутся на 50 метеостанциях. Результаты обработки многолетних данных по всем метеостанциям позволяют сделать вывод о том, что среднегодовая скорость ветра на территории республики колеблется в пределах от $3,6$ до $5,6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, при средней скорости $4,6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Характер изменения сезонного движения воздушных масс по данным всех метеостанций страны примерно одинаков (табл. 1.3).

Таблица 1.3. Показатели изменения средней скорости ветра в течение года (по месяцам) [4]

Показатель	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Средняя скорость, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	6,2	5,9	5,9	5,7	5,1	4,5	4,4	4,2	4,5	5,5	6,1	6,1

Интенсивное использование средств химической защиты растений в растениеводстве приходится на апрель–июль. В этот период среднемесячная скорость ветра близка среднегодовой и находится в пределах $4,4...5,7 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, а количество дней с безветренной погодой составляет в месяц от 7 до 12 (в среднем 9,5).

С апреля по август среднедневные скорости ветра превышают допустимые пределы при МО в $1,5...2$ раза и при УМО – в $2...3$ раза.

Снос капель рабочего раствора из зоны обработки зависит от способов и средств внесения пестицидов. Потери пестицида из-за сноса иногда достигают 90 %. При работе опрыскивателей величина сноса определяется не только размером капель, но и скоростью и направлением ветра, высотой установки распылителей над обрабатываемым объектом [4, 5, 7]. Величины сноса капель (расстояние падения от края обрабатываемой полосы) зависимости от их диаметра и скорости ветра приведены в табл. 1.4

Таблица 1.4. Величина сноса капель жидкости с высоты падения 0,5 м в зависимости от их диаметра и скорости ветра [1]

Диаметр капель, мкм	Скорость оседания капель, м · с ⁻¹	Скорость ветра, м · с ⁻¹		
		1	2	3
10	0,003	333,0	500,0	833,3
20	0,012	83,3	225,0	208,0
40	0,046	21,7	32,6	54,2
60	0,100	10,0	15,0	25,0
80	0,170	5,9	8,8	14,7
100	0,250	4,0	6,0	10,0
120	0,340	2,9	4,4	7,4
140	0,430	2,3	3,5	5,8
200	0,720	1,4	2,1	3,5
250	0,900	1,1	1,7	2,8
300	1,150	0,9	1,3	2,2
400	1,600	0,6	0,9	1,6
500	2,200	0,5	0,7	1,1

Для повышения качества обработки сельскохозяйственных культур (при наличии ветра) предлагается ряд конструкторских решений: уменьшение высоты установки распылителей и использование гидравлических распылителей с большими соплами или инжекторных распылителей; применение электрической зарядки частиц; использование пенного опрыскивания; применение пестицидно-полимерных нитей; установка дополнительных распылителей и специальных ветрозащитных устройств; принудительная доставка капель к объекту обработки воздушным потоком.

При обработках в ветреную погоду необходимо как можно ближе расположить штангу над обрабатываемой поверхностью. Известно, что с увеличением высоты штанги всего на 10 см потери препарата из-за сноса в пределах агротехнически допустимой скорости ветра возрастают в 2 раза. Поэтому при обработках в ветреную погоду применяют распылители с широким факелом распыла, что обеспечивает уменьшение высоты расположения штанги над обрабатываемой поверхностью. Переход от распылителей с углом распыления 80...90° к распылителям с углом распыления 110...120° позволяет снизить высоту штанги на 25 см и потери за счет сноса рабочей жидкости.

Одним из известных способов повышения качественных показателей процесса опрыскивания является применение электрических полей для электризации и осаждения диспергируемого жидкого пестицида на обрабатываемые растения. Раствор пестицида искусственно заряжается в сильном электрическом поле, после чего дробится на капли. Дальнейшее осаждение аэрозоля происходит с участием электрических сил, которые по своей величине могут быть соизмеримы и в несколько раз превосходить силы гравитации и воздушной среды. Силы внешнего электрического поля оказывают воздействие на всем пути движения частиц от зарядного устройства до растения. Они заставляют двигаться заряженные частицы от источника аэрозоля к обрабатываемому растению вдоль линий напряженности электрического поля. Эти линии имеют криволинейную форму и замыкаются на различных поверхностях растений, поэтому движущиеся по ним частицы могут распространяться по всем поверхностям [6, 42].

Опрыскиватели с использованием электрической зарядки капель дорогостоящи, сложны в изготовлении и эксплуатации, предъявляют повышенные требования безопасности и поэтому не находят широкого применения в сельскохозяйственном производстве.

В настоящее время известна принципиально новая технология использования связанного аэрозоля, получаемого путем добавления к пестициду незначительного (1,4...3,0 %) количества экологически нейтральной нитеобразующей добавки и наполнителя (технического ксилола). Радикальное уменьшение сноса связано с различием процессов распыления жидкости и прядения нитей. Сокращение доз пестицида обусловлено повышенной долей попадания пестицидно-полимерных нитей непосредственно на обрабатываемые объекты. В силу специфики процесса, попадание пестицида в почву и ее загрязнение сокращаются по сравнению с обычным опрыскиванием. Однако наиболее сложными аспектами новой технологии являются: получение длинных тонких нитей (20...60 мкм) и нанесение их на обрабатываемые объекты. При скорости современных опрыскивателей 6...10 км·ч⁻¹ необходимо производить около 4000 м нити в 1 с [4, 6].

Удерживаемость пестицидов и их проникновение вглубь растения можно повысить применением рабочих жидкостей в виде пены. Добавление небольшого количества поверхностно-активных

веществ к раствору пестицида обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с обычным опрыскиванием. Основные достоинства пенного опрыскивания: уменьшение степени сноса, экономия препарата за счет лучшего проникновения и осаждения на обрабатываемый объект, меньшая опасность повреждения соседних культур, чувствительных к вносимым пестицидам, возможность работы машины при более сильном ветре, четкая фиксация границ обработки [6].

Несмотря на это, пенное опрыскивание не находит широкого применения. Основные причины: большие затраты на изготовление специальных опрыскивателей и их эксплуатацию.

На величину потерь по причине сноса существенным образом оказывают влияние расстояние до обрабатываемой поверхности, скорость и направление ветра [4, 5, 7], поэтому необходимо оградить факел распыла от прямого воздействия ветра.

Одним из направлений поиска решений является применение ветрозащитных устройств [4, 43]. По принципу действия они делятся на три группы (рис. 1.24): 1) пассивные, 2) активные, 3) комбинированные [4, 44, 45].

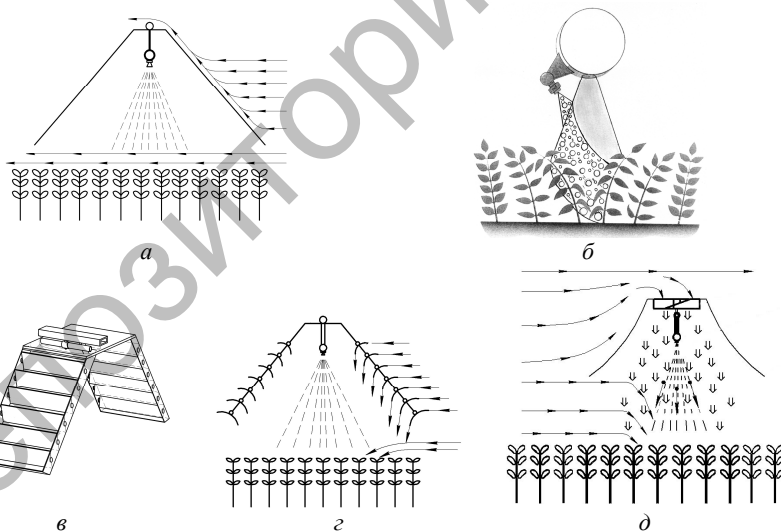


Рис. 1.24. Схемы ветрозащитных устройств:
a – пассивного действия; *б* – активного действия;
в, г, д – комбинированного действия

К ветрозащитным устройствам пассивного действия (рис. 1.24, а) относятся различные конструкции козырьков или щитков [4], которые полностью или частично на стадии формирования факела исключают воздействие на него ветра. При этом происходит перенаправление воздушного потока вверх так, что он проходит над распылителем, не воздействуя на капли. Данный тип устройств нашел применение в опрыскивателях фирмы *John Deere*.

Недостатком конструкций данных ветрозащитных устройств является невозможность полной защиты факела распыла от ветра вследствие наличия зазора между нижними краями козырька и обрабатываемой поверхностью, что вызвано недопущением повреждения последней вследствие возникновения колебаний несущих конструкций, на которых закреплены ветрозащитные устройства (например, штанга опрыскивателя). При этом в пространство между нижними краями козырька и поверхностью проникает направленный воздушный поток, обладающий, вследствие уменьшения пространства, большой скоростью. Это приводит к повышенному боковому воздействию на оседающие капли, изменению траекторий их движения, следовательно, к небольшому сносу рабочего раствора и повышению неравномерности распределения пестицидов по обрабатываемому объекту. Кроме того, увеличение рабочих поверхностей козырьков, с одной стороны, позволяет снизить степень воздействия ветра на капли пестицида. С другой стороны, вследствие большой площади щитков, воспринимающих своей поверхностью давление встречного воздушного потока, приводит к увеличению аэродинамической нагрузки, влекущей за собой возрастание сопротивления движению агрегата. Следовательно, увеличиваются энергозатраты на выполнение технологического процесса, повышается воздействие на несущую конструкцию штанги, возникают ее колебания, что может привести к повреждению растений и повлечь неравномерность распределения рабочего раствора в продольном направлении.

Ветрозащитные устройства активного действия (рис. 1.24, б) основаны на использовании дополнительных устройств, создающих воздушный поток, который осаждает капли на объект обработки. Он позволяет проводить опрыскивание при скорости ветра до $8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (простое опрыскивание – до $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) [4, 6], при этом практически сводя к минимуму снос мелких капель и обеспечивая экономию препаратов до 25...30 %, а также создавая условия для качественного покрытия всего обрабатываемого растения за счет проникающей способности направленной воздушной струи.

Образующийся при распыливании воздушно-капельный поток, обладая высокой кинетической энергией, в наименьшей степени подвержен сносу, что позволяет производить опрыскивание при ветреной погоде, удлинняя время дневной работы. Одновременно снижается испарение воды, что обеспечивает работу при более высоких дневных температурах. Потребление воды можно снизить до $100 \text{ л} \cdot \text{га}^{-1}$ (вместо $150 \dots 300 \text{ л} \cdot \text{га}^{-1}$), что снижает себестоимость обработки. Кроме того, появляется возможность до 50 % увеличить рабочую скорость агрегата, следовательно, и производительность [4, 6].

Совместное использование ветрозащитных устройств активного действия и инжекторных распылителей позволяет на 13 % повысить качество покрытия обработанной поверхности [4, 45].

Ветрозащитное устройство активного действия может быть изготовлено и без воздухораспределительных рукавов. При этом каждый распылитель снабжается вентилятором с приводом.

Конструкции ветрозащитных устройств комбинированного действия (см. рис. 1.24, в, з, д) основаны на положительных сторонах предыдущих групп. Они позволяют использовать энергию ветра для защиты факела распыла. Конструкции рабочих органов ветрозащитных устройств подобраны так, что обеспечивают перенаправление потока ветра, который не только транспортирует капли к обрабатываемому объекту, но и, взаимодействуя с основным воздушным потоком, защищает факел распыла от его прямого воздействия. Условиями правильной работы таких ветрозащитных устройств являются рациональное использование энергии ветра, наименьшее аэродинамическое сопротивление движению агрегата и недопущение оседания капель рабочего раствора на их рабочие элементы (в любой момент времени траектория движения капли в факеле распыла не должна пересекать оси рабочих элементов) [4, 45].

1.4.5. Распределение рабочей жидкости вдоль линии движения опрыскивателя и по ширине штанги опрыскивателя

В процессе работы опрыскивателя по разным причинам могут возникать проблемы, влияющие на равномерность распределения рабочей жидкости по ширине захвата и вдоль движения агрегата:

несоответствие нормы внесения при изменении рабочей скорости; изменение расхода жидкости вследствие перепадов давлений в жидкостной напорной магистрали; неправильный выбор высоты установки штанги; непостоянство расстояния между распылителями и обрабатываемой поверхностью по всей длине штанги (угол установки, колебания штанги).

1.4.5.1. Соблюдение норм внесения при изменении рабочей скорости

Основным фактором, влияющим на неравномерность распределения по линии внесения, является рабочая скорость движения опрыскивателя. Рекомендуемая скорость движения опрыскивателей при работе со щелевыми распылителями не превышает $7-8 \text{ км}\cdot\text{ч}^{-1}$ [41]. Это связано и с усилением ветрового сноса, и с горизонтальными колебаниями штанги, которые все равно возникают, каким бы ровным не было поле. Дальнейшее увеличение скорости означает дополнительные потери, но они могут быть разумными при правильном выборе нормы расхода, подборе распылителя, сертифицированного для работы на повышенных скоростях.

Перепады давления в напорной жидкостной магистрали могут быть вызваны перебоями в работе насоса, регулятора-делителя потоков.

Для исключения влияния перепадов давления, нормы внесения пестицидов и скорости движения агрегата на равномерность распределения рабочей жидкости в конструкциях опрыскивателей используются устройства для стабилизации расхода путем поддержания постоянного давления в напорной магистрали и механизмов автоматизированного изменения расхода жидкости при изменении рабочей скорости движения агрегата. Насосы снабжены устройствами, сглаживающими пульсации жидкости.

Кроме того, неравномерность распределения пестицидов по ширине захвата во многом зависит от качества и степени изношенности распылителей. В большинстве стран установлены нормативы по значениям коэффициента вариации для распылителей: он должен находиться в пределах $5...15 \%$ [4]. По мере износа выходного сопла коэффициент растет. Фирма *TeeJet* приводит такую зависимость

коэффициента вариации для распылителей: новый – 6 %, изношенный – 35, поврежденный – более 57 %. Поэтому необходима своевременная замена распылителей, а в большинстве случаев – полная замена перед началом сезона обработок.

1.4.5.2. Оптимальный выбор высоты установки штанги

Одним из приемов уменьшения потерь является правильный выбор высоты установки штанги над обрабатываемой поверхностью. Оптимальной считается высота, при которой пересечение факелов распыления рабочей жидкости происходит на середине расстояния между штангой и обрабатываемой поверхностью. Высота штанги определяется углом распыления: чем он больше, тем меньше ее высота над обрабатываемой поверхностью. В большинстве случаев настройка высоты выполняется исходя из отношения расстояния между распылителями к высоте, равного 1:1. Например, плоскоструйные распылители с углом распыления $110...120^\circ$ и расстоянием 50 см друг от друга устанавливаются на высоте 50 см над обрабатываемой поверхностью. Допускается установка штанги на высоту до 75 см, но при этом надо либо увеличить шаг расстановки распылителей до 75 см, либо использовать распылители с углом распыления $80...90^\circ$, учитывая отношение расстояния между распылителями к высоте 1:1,5 [46]. Критическим фактором является достижение двойного перекрытия рисунка распыления. При изменении высоты штанги всего на 10 см расход рабочей жидкости в зоне перекрытия увеличивается на 40 %, а в остальной зоне – снижается на 30 % [47].

В конструкциях полевых штанговых опрыскивателей изменение высоты установки штанги над обрабатываемой поверхностью осуществляется с использованием гидравлической системы энергетического средства (трактора, самоходного шасси). При этом данный процесс может осуществляться следующими способами:

- штанга навешивается на шток гидроцилиндра изменения высоты (рис. 1.25, а);
- штанга навешивается на параллелограммный механизм изменения высоты, звенья которого изменяют угол наклона при помощи одного или двух гидроцилиндров (рис. 1.25, б);

– высота установки штанги изменяется при помощи элементов гибкой связи (тросо-блочная система) (рис. 1.25, в).



а



б



в

Рис. 1.25. Механизмы изменения высоты установки штанги

При этом высота установки штанги должна контролироваться в начале работ и при заправке опрыскивателя. Для более точного расположения штанги над обрабатываемой поверхностью и корректировки его в процессе работы в конструкциях современных опрыскивателей используются автоматизированные системы контроля и управления, основанные на использовании различных датчиков.

1.4.5.3. Обеспечение расстояния между распылителями и обрабатываемой поверхностью по всей длине штанги

Угол установки штанги

Важным условием качественной работы опрыскивателя является постоянство расстояния между распылителями и обрабатываемой поверхностью по всей длине штанги. Изменение угла наклона штанги приводит к нарушению геометрии факелов распыла (рис. 1.26, *а*), что влечет перераспределение рабочей жидкости по ширине захвата. При наклоне крайней секции штанги ухудшается качество распределения жидкости более чем в 2 раза, причем в большей степени это сказывается при установке узкофакельных распылителей (1.26, *б*).

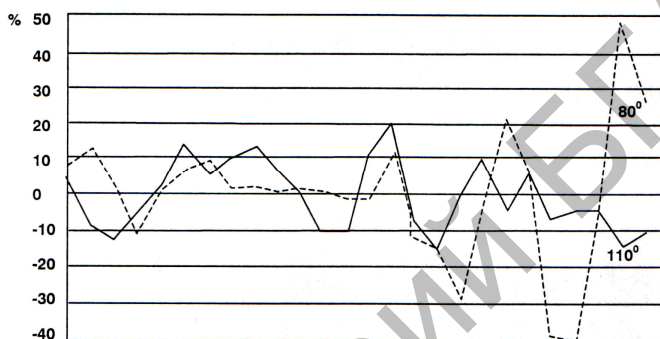
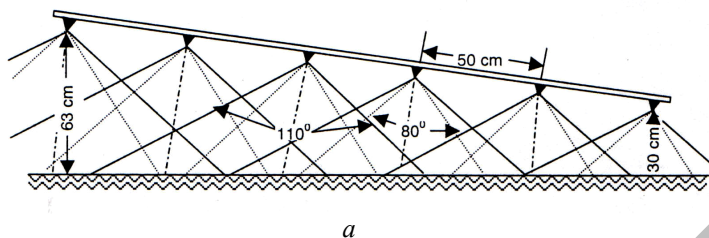


Рис. 1.26. Графики влияния наклона штанги на равномерность распределения жидкости [1]

Поэтому при движении по склону должна соблюдаться параллельность установки штанги обрабатываемой поверхности (рис. 1.27).

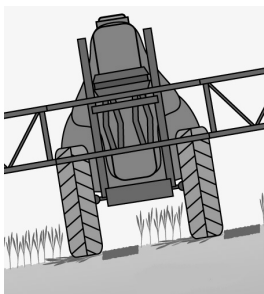


Рис. 1.27. Схема расположения штанги при работе опрыскивателя на склоне [48]

Для регулировки угла установки штанги в вертикальной плоскости относительно горизонта в конструкциях опрыскивателей имеются соответствующие механизмы (рис. 1.28). В зависимости от способа управления процессом изменения угла наклона штанги различают механизмы ручного (рис. 1.28, *а*), электрического (рис. 1.28, *б*) и гидравлического (рис. 1.28, *в*) действия.

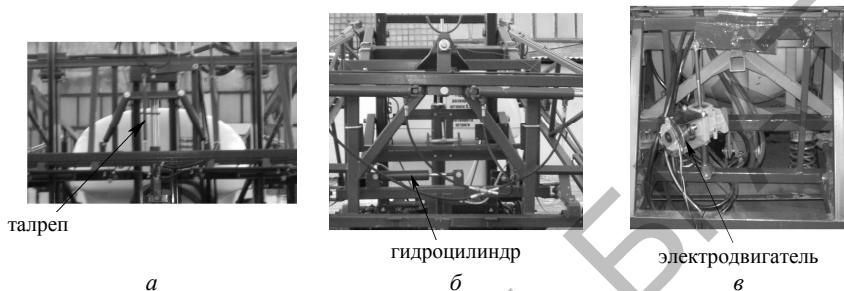


Рис. 1.28. Механизмы изменения угла наклона штанги

В конструкциях опрыскивателей используются механизмы изменения угла наклона всей штанги, отдельно ее правого или левого крыла (рис. 1.29, *а*) [48] или каждой секции (рис. 1.29, *б*) [38].

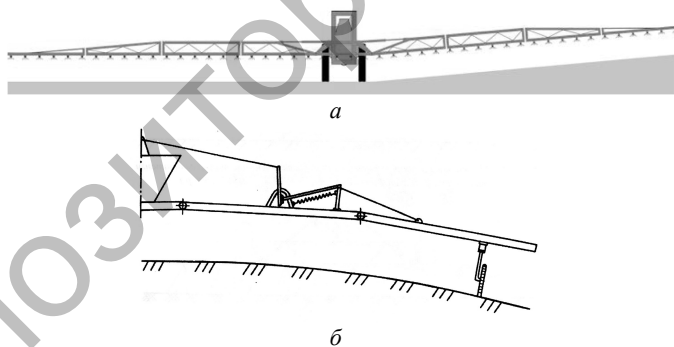


Рис. 1.29. Схема изменения угла наклона каждого крыла штанги опрыскивателя

Использование механизмов изменения углов наклона электрического и механического действия позволяет применять в конструкциях опрыскивателей датчики и системы автоматизированного управления положениями штанги в процессе работы на склонах (рис. 1.30, 1.31).

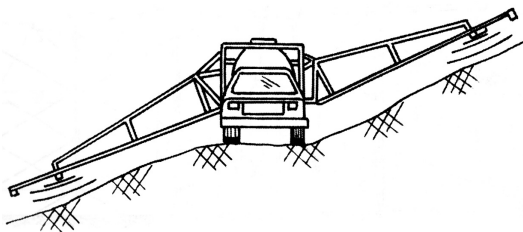


Рис. 1.30. Схема работы автоматизированной системы контроля за положением штанги относительно обрабатываемой поверхности [38]

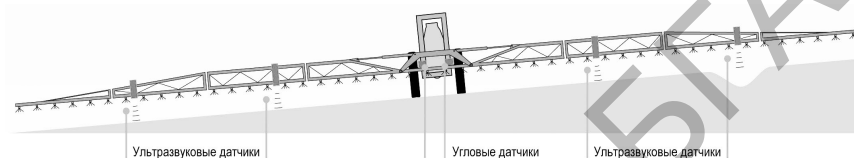


Рис. 1.31. Схема работы автоматизированной системы обеспечения расстояния между распылителями и обрабатываемой поверхностью *Distance control Amazone* [48]

Для точного копирования рельефа поля на крайних секциях штанги опрыскивателей могут устанавливаться дополнительные опорные колеса. Однако они эффективны при довсходовых обработках, так как при движении по технологической колее возможны повреждения всходов даже при отклонении движения агрегата на 10 см (рис. 1.32, а, б).

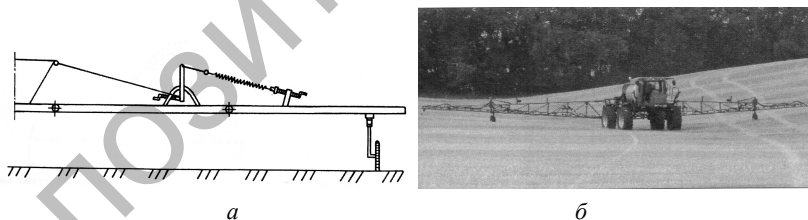


Рис. 1.32. Использование дополнительных опорных колес на штанге опрыскивателя [49]

Колебания штанги

Равномерность распределения пестицидов по ширине захвата обеспечивается соблюдением технологических параметров во время движения агрегата. При движении опрыскивателя по полю

его штанга совершает динамические колебания в вертикальной и горизонтальной плоскостях (рис. 1.33–1.35), что влияет не только на качество выполнения технологической операции, но и надежность конструкции сельскохозяйственной машины [50]. Даже в условиях хорошо выровненной поверхности поля при скорости движения трактора $8 \text{ км} \cdot \text{ч}^{-1}$ амплитуда колебаний штанги длиной 12 м может достигать значений $\pm 20 \text{ см}$ [47, 50].

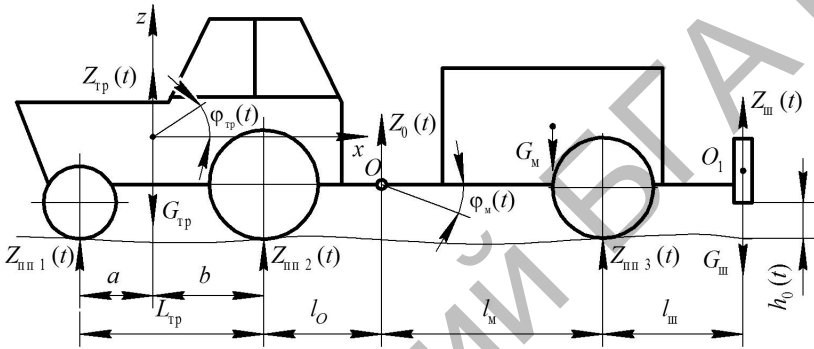


Рис. 1.33. Расчетная схема агрегата в продольной вертикальной плоскости

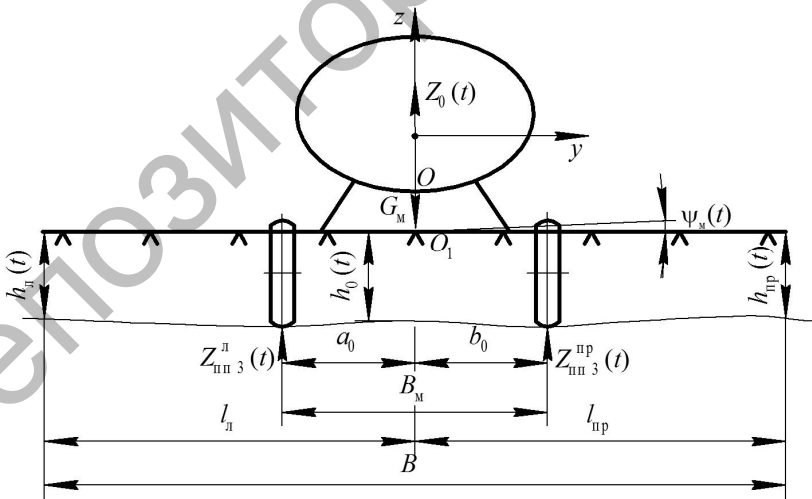


Рис. 1.34. Расчетная схема агрегата в поперечной вертикальной плоскости

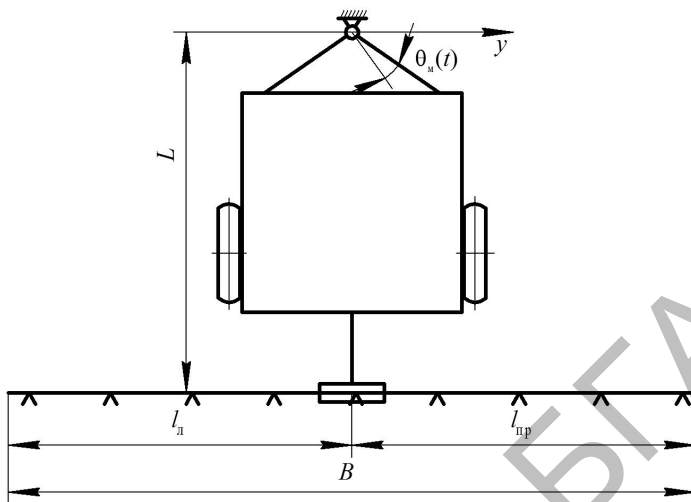


Рис. 1.35. Расчетная схема агрегата в горизонтальной плоскости (вид сверху)

При выполнении технологического процесса опрыскивания агрегат, состоящий из трактора и штангового опрыскивателя, находится под воздействием непрерывно изменяющихся возмущений, обусловленных рельефом поверхности поля $Z_{шт}(t)$ под опорными колесами трактора и опрыскивателя. Эти возмущения вызывают колебания штанги $Z_{шт}(t)$ опрыскивателя в продольно-вертикальной и поперечно-вертикальной плоскостях, и при движении по полю изменяются расстояния $h_i(t)$ от поверхности поля до каждого из распылителей [50].

Во время работы опрыскиватель также колеблется относительно трактора в трех взаимно-перпендикулярных плоскостях по координатам: $\varphi_m(t)$ – колебания опрыскивателя в продольно-вертикальной плоскости (см. рис. 1.33); $\psi_m(t)$ – колебания опрыскивателя в поперечно-вертикальной плоскости (см. рис. 1.34); $\theta_m(t)$ – колебания опрыскивателя в горизонтальной плоскости (см. рис. 1.35).

При известных $Z_o(t)$ и $\varphi_m(t)$ определены траектория и величина колебаний точки O_1 (точка подвески штанги) [50]:

$$\begin{aligned}
 Z_{\text{ш}}(t) = Z_O(t) + l_{\text{ш}} \varphi_M(t) = & \frac{Z_{\text{пн}1}(t)b + Z_{\text{пн}2}(t)a}{L_{\text{тр}}} + l_O \left(\frac{Z_{\text{пн}1}(t) - Z_{\text{пн}2}(t)}{L_{\text{тр}}} \right) + \\
 + l_{\text{ш}} \left(\frac{Z_O(t) - Z_{\text{пн}3}^0(t)}{l_M} \right) = & \frac{Z_{\text{пн}1}(t)b + Z_{\text{пн}2}(t)a}{L_{\text{тр}}} + l_O \left(\frac{Z_{\text{пн}1}(t) - Z_{\text{пн}2}(t)}{L_{\text{тр}}} \right) + \\
 + \frac{l_{\text{ш}}}{l_M} \left[\frac{Z_{\text{пн}1}(t)b + Z_{\text{пн}2}(t)a}{L_{\text{тр}}} + l_O \left(\frac{Z_{\text{пн}1}(t) - Z_{\text{пн}2}(t)}{L_{\text{тр}}} \right) - \frac{Z_{\text{пн}3}^{\text{л}}(t) + Z_{\text{пн}3}^{\text{п}}(t)}{2} \right], &
 \end{aligned}$$

где $Z_{\text{пн}1}(t)$ – рельеф поверхности поля под передними колесами трактора;

b – расстояние от оси задних колес до центра тяжести трактора по горизонтали;

$Z_{\text{пн}2}(t)$ – рельеф поверхности поля под задними колесами трактора;

a – расстояние от оси передних колес до центра тяжести трактора по горизонтали;

$L_{\text{тр}}$ – продольная база трактора.

Величину колебаний штанги опрыскивателя $\varphi_M(t)$ относительно точки O можно определить по формуле [50]

$$\varphi_M(t) = \frac{Z_O(t) - Z_{\text{пн}3}^0(t)}{l_M},$$

где $Z_{\text{пн}3}^0(t)$ – средняя величина рельефа поверхности поля под колесами опрыскивателя;

l_M – расстояние от точки прицепа до точки опоры колеса.

$$Z_{\text{пн}3}^0(t) = \frac{Z_{\text{пн}3}^{\text{л}}(t)b_0 + Z_{\text{пн}3}^{\text{п}}(t)a_0}{B_M},$$

где $Z_{\text{пн}3}^{\text{л}}(t)$, $Z_{\text{пн}3}^{\text{п}}(t)$ – рельеф поверхности поля под левым и правым колесами опрыскивателя;

b_0, a_0 – расстояние, соответственно, от левого и правого колес до центра тяжести опрыскивателя;

B_M – расстояние между колесами.

$$\text{При } b_0 = a_0 = \frac{B_M}{2} \quad Z_{\text{шп}3}^0(t) = \frac{Z_{\text{шп}3}^{\text{л}}(t) + Z_{\text{шп}3}^{\text{п}}(t)}{2}.$$

Зная величину установленной высоты расположения штанги от поверхности поля $h_{0\text{уст}}$, можно определить текущее значение и траекторию перемещения середины штанги:

$$h_0(t) = h_{0\text{уст}} + Z_{\text{ш}}(t).$$

Равномерное распределение рабочей жидкости распылителями опрыскивателя обеспечивают колебания левого $h_{\text{л}}(t)$ и правого $h_{\text{п}}(t)$ крыльев штанги в допустимых пределах. Согласно агротребованиям, эта величина составляет $\pm 0,2$ м [50].

Согласно расчетной схеме (см. рис. 1.35), угловые колебания штанги $\varphi_M(t)$ в поперечно-вертикальной плоскости определяются по зависимости

$$\varphi_M(t) = \frac{Z_{\text{шп}3}^{\text{л}}(t) - Z_{\text{шп}3}^{\text{п}}(t)}{B_M}.$$

При известных установочной высоте крепления штанги $h_{0\text{уст}}$, $Z_{\text{ш}}(t)$, $\varphi_M(t)$ можно определить величину текущего значения расстояния любого левого $h_{\text{ли}}(t)$ или правого $h_{\text{при}}(t)$ распылителей от поверхности поля:

$$h_{\text{ли}}(t) = h_0(t) + \psi_M l_{\text{ли}} = h_{0\text{уст}} + Z_{\text{ш}}(t) + \left(\frac{Z_{\text{шп}3}^{\text{л}}(t) - Z_{\text{шп}3}^{\text{п}}(t)}{B_M} \right) l_{\text{ли}};$$

$$h_{\text{при}}(t) = h_0(t) + \psi_M l_{\text{при}} = h_{0\text{уст}} + Z_{\text{ш}}(t) + \left(\frac{Z_{\text{шп}3}^{\text{л}}(t) - Z_{\text{шп}3}^{\text{п}}(t)}{B_M} \right) l_{\text{при}},$$

где $l_{\text{ли}}$, $l_{\text{при}}$ – расстояние от центра до соответствующего распылителя.

В результате проведенных исследований [50] были получены зависимости влияния ширины колеи опрыскивателя и направления движения агрегата по полю (определяется углом γ), определяющие значения величин и частоты микронеровностей поверхности, на отклонения краев штанги (рис. 1.36).

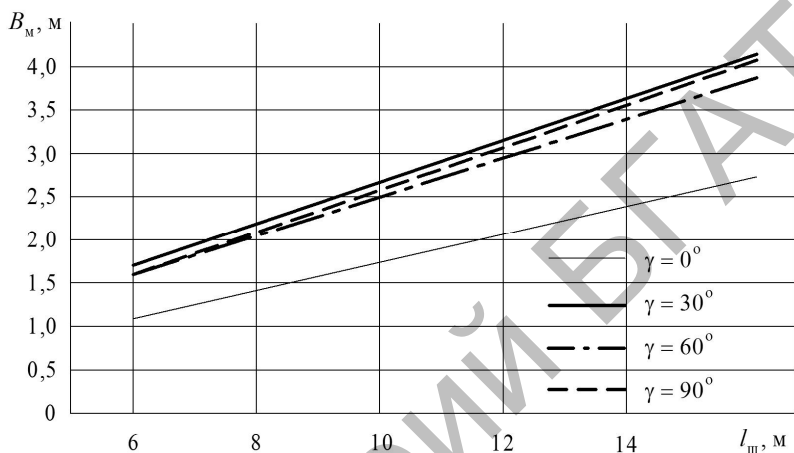


Рис. 1.36. Графики изменения расстояния между колесами опрыскивателя (B_M) для обеспечения допустимых значений колебаний штанги ($\pm 0,2$ м) в зависимости от длины крыла штанги $l_{шт}$ и направления движения по полю относительно предыдущей обработки: продольный – $\gamma = 0^\circ$; по диагонали – $\gamma = 30^\circ$, $\gamma = 60^\circ$; поперечный – $\gamma = 90^\circ$

Известно, что на амплитуду колебаний штанги влияют ее масса и микронеровности поверхности поля. Для уменьшения массы штанги используются специальные облегченные профили и материалы из сплавов алюминия (рис. 1.37, а–в).

Секция штанги *Hardi* (рис. 1.37, в, г) разработана в виде трехмерной конструкции из углеволокна, которое улучшает характеристики штанги, прежде всего из-за низкого веса и жесткости материала. Уменьшенная масса крайней секции позволяет центральной части затрачивать меньше усилий при управлении штангой во время движения по неровной поверхности. Масса крайней секции из углеволокна приблизительно в 4 раза ниже, чем из алюминия, а прочность значительно выше [90].

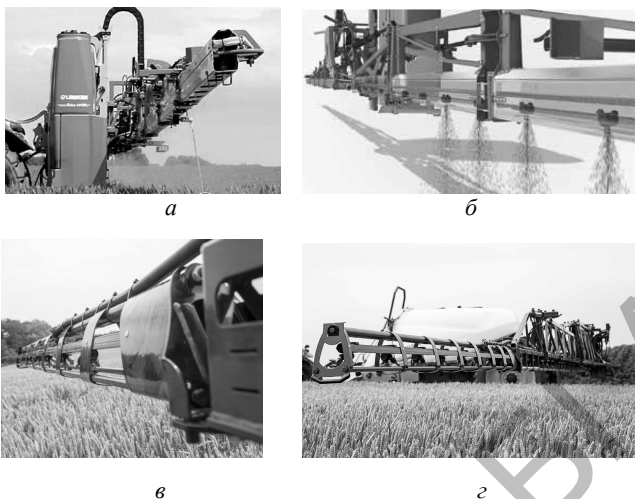


Рис. 1.37. Штанги облегченной конструкции:
Lemken (а, б) [51], Hardi (в, г) [90]

Исполнение несущей конструкции штанги и способ ее крепления к раме опрыскивателя определяют его надежность и технологические режимы работы, а также качество выполняемого процесса. Подвеска штанги является важным элементом конструкции современного опрыскивателя и призвана изолировать штангу от возмущений рамы (места навески), вызванных микропрофилем поля. Подвеска штанги в большой мере определяет плавность хода ее, которая взаимосвязана с равномерностью опрыскивания.

Жесткое крепление штанги или ее составных частей к несущей раме опрыскивателя налагает ограничение на рабочие скорости движения агрегата и ширину захвата, следовательно, и на его производительность, что не позволяет обеспечить качественную обработку агрофонов, засоренных камнями, с высокой неровностью поверхности поля. Этот тип крепления оправдан только при ширине захвата до 15 м и рабочих скоростях до $6...7 \text{ км} \cdot \text{ч}^{-1}$ [38].

В зависимости от принципа обеспечения штангой постоянного расстояния между обрабатываемой поверхностью по ширине захвата различают системы активной, пассивной и комбинированной стабилизации [36].

К системам активной стабилизации относятся штанги с опорными колесами (см. рис. 1.32) и автоматической стабилизацией.

Использование опорных колес позволяет обеспечить перераспределение веса штанги, копировать рельеф поля и тем самым обеспечивать постоянство расположения штанги над обрабатываемой поверхностью. Данные системы эффективны при обработках чистых паров, незасеянных и убранных полей. При наличии всходов и посевов происходит наезд колес на растения и их травмирование.

Поэтому на практике широкое применение получили навески с пассивными и комбинированными системами стабилизации. При пассивной стабилизации штанги используются маятниковые (рис. 1.38) и шарнирно-рычажные (рис. 1.39) подвески. Однако при их использовании в конструкциях опрыскивателей, работающих на склонах, возникает необходимость корректировки параллельности штанги обрабатываемой поверхности. Поэтому используется комбинированная система стабилизации.

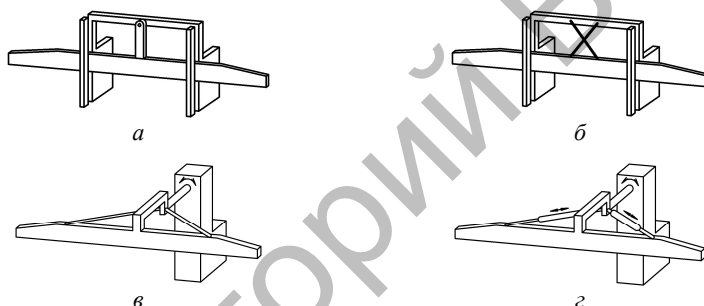


Рис. 1.38. Схемы маятниковых подвесок штанговых опрыскивателей:
a – ведомый направленный маятник (ведомая); *б* – направленный канатный маятник; *в* – жесткий маятник; *г* – свободный маятник

Независимая подвеска штанги с системами стабилизации, позволяющими обеспечить высокую плавность хода распределительной штанги, оправдана в конструкциях агрегатов, имеющих ширину захвата >15 м.

В связи с постоянными совершенствованиями конструкций опрыскивателей, направленных на повышение производительности за счет увеличения ширины захвата и рабочей скорости движения агрегатов, все большее внимание уделяется разработке несущих конструкций и систем навешивания штанг. Среди конструкций независимого крепления штанги к раме опрыскивателя выделяются маятниковые (рис. 1.38) и шарнирно-рычажные маятниковые подвески (рис. 1.39) [36, 38]. Различают одно-, двух-, трех- и четырехточечные навески.

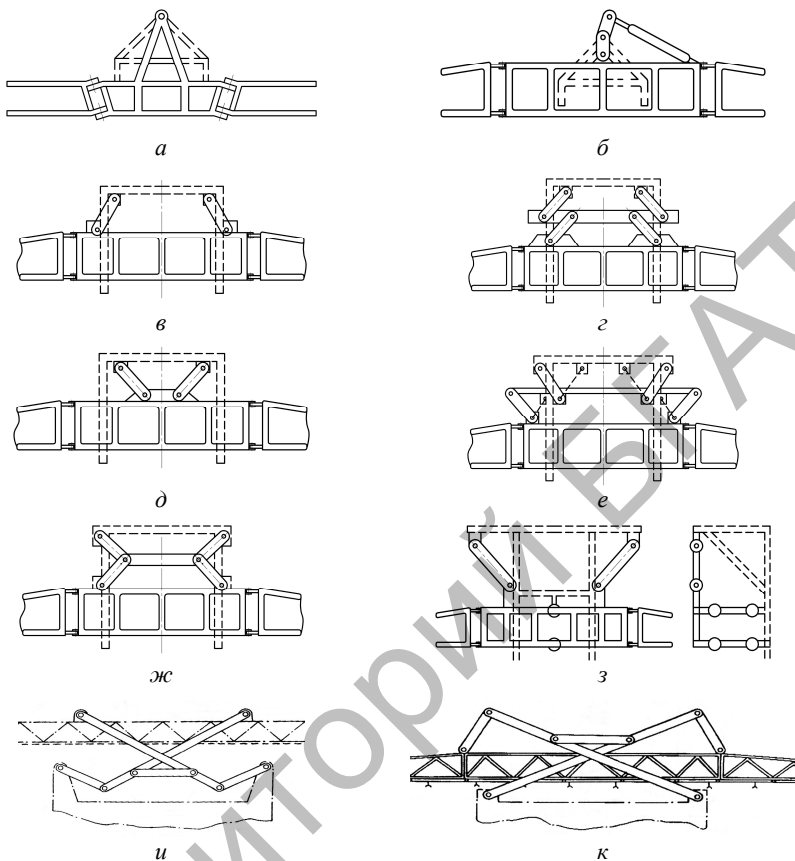


Рис. 1.39. Схемы шарнирно-рычажных маятниковых подвесок штанговых опрыскивателей:

- a* – одношарнирная маятниковая подвеска;
- б* – маятниковая подвеска с качающимся грузом-балансиром;
- в* – двухшарнирная (А-образная) маятниковая подвеска;
- з* – четырехшарнирная (А-образная) маятниковая подвеска;
- д* – двухшарнирная (V-образная) маятниковая подвеска;
- е* – четырехшарнирная (V-образная) маятниковая подвеска;
- ж* – четырехшарнирная (Ж-образная) маятниковая подвеска;
- з* – универсальная двухшарнирная подвеска;
- и* – маятниковая шарнирная (X-образная) подвеска;
- к* – маятниковая шарнирная (X-образная) подвеска

При навешивании штанги по схемам ведомого направленного и направленного канатного маятников штанга движется между направляющими, ограничивающими ее отклонения в направлении

движения агрегата, и может совершать движение только в поперечно-вертикальной плоскости. При навешивании штанги по схемам жесткого и свободного маятников при ее отклонении в поперечном и продольном направлениях возникает стабилизирующий момент, который обеспечивает возвращение штанги в равновесное положение.

Шарнирно-рычажные подвески, выполненные в форме трапеции, сочетают эффект маятниковой и параллелограммной подвесок. Наряду со стабилизацией от угловых колебаний, они способствуют уменьшению поперечных смещений штанги и обеспечивают более точное параллельное ведение ее относительно обрабатываемой поверхности [36].

В зависимости от положения точек пересечения осей наклонных тяг (выше или ниже точек крепления их к раме) подвески подразделяются на А-образные, V-образные, Ж-образные и Х-образные. V-образная подвеска позволяет штанге сохранять стабильное положение относительно обрабатываемой поверхности независимо от угла наклона местности. А-образная подвеска более устойчивая, поэтому эффективна на полях с незначительным уклоном рельефа.

Маятниковая подвеска штанги используется при работе на полях ровного рельефа, а шарнирно-рычажная – при работе на склонах.

На равномерность опрыскивания по рабочей ширине в основном влияют вертикальные колебания штанги, а на продольную неравномерность – продольные колебания штанги (в направлении движения). На неравномерность опрыскивания в направлении движения продольные колебания влияют 7 раз сильнее, чем вертикальные [13].

В подвесках должен выполняться основной принцип виброизоляции, который требует, чтобы собственная частота объекта виброизоляции была ниже частоты возбуждения [13]. По отношению к опрыскивателям это значит, что собственная частота подвески должна быть меньше собственной частоты рамы опрыскивателя. Собственная частота колебаний системы k определяется лишь свойствами самой колебательной системы:

$$k = \sqrt{\frac{c}{m}},$$

где c – коэффициент жесткости упругой связи;
 m – масса объекта виброизоляции.

Для борьбы с вибрацией используются четыре основных метода: снижение виброактивности источника; внутренняя виброзащита объекта; динамическое гашение колебаний; виброизоляция [13]. По отношению к штанговым опрыскивателям объектом виброзащиты является штанга, а источником возмущения штанги является рама опрыскивателя, которая, в свою очередь, возмущается от микропрофиля фона. Микропрофили сельскохозяйственных фонов имеют вероятностный характер колеи (как правой, так и левой) [13], а случайные возмущения генерируют и случайные колебания самого опрыскивателя и штанги.

Высокая плавность хода штанги может быть достигнута при помощи *первого метода виброзащиты*: путем отличной амортизации самого опрыскивателя достигнут низкий уровень виброактивности рамы (рис. 1.40), а также повышенной культурой земледелия, позволяющей более качественно выровнять поверхность поля и снизить интенсивность возбуждающего воздействия его фона.



Рис. 1.40. Опрыскиватель на шинах низкого давления

В пределах *внутренней виброзащиты объекта* отличают два способа [13]: устранение резонансных явлений и увеличение диссипации механической энергии в объекте. Как было отмечено ранее, во избежание резонанса необходима должная отстройка собственной частоты объекта, отличная от частоты возбуждения, причем собственная частота должна быть меньше низшей из основных полос частот возбуждения. Если нет возможности отстройки частот, тогда снижение интенсивности колебаний в резонансном и околорезонансном режимах возможно двумя путями [13]: обеспечением достаточной общей нелинейности упругих связей подвески или увеличением демпфирования. В данном случае демпфирование полезно

только в околорезонансной области. Упругая подвеска без демпфирования в области частот возбуждения, не превышающих собственную частоту объекта виброизоляции, более чем 1,41 раза усиливает колебания. В этой области и полезно определенное демпфирование. Следует отметить, что уже при коэффициенте поглощения 0,25...0,30 за один период колебания поглощается более **95 %** энергии, а уменьшение частоты колебаний при таком коэффициенте поглощения составляет около 4 % [13]. Когда частота возбуждения более чем 1,41 раза превышает собственную частоту объекта, коэффициент виброизоляции упругой подвески ниже единицы, и чем больше разница в частотах, тем меньше коэффициент виброизоляции. В этой зарезонансной области демпфирование нежелательно, так как сила сопротивления от демпфирования по фазе приближается к возмущающей силе, и уровень колебаний усиливается по сравнению с положением без демпфирования.

Динамическое гашение колебаний основывается на присоединении к объекту виброизоляции посредством только упругого (при гармонической возбуждении) или упругого и демпфирующего элементов дополнительного объекта (гасителя) с таким выбором параметров гасителя, при которых дополнительное динамическое воздействие на объект виброизоляции частично уравнивает (компенсирует) динамическое воздействие, возбуждаемое источником. Реализацией данного метода для штанги является установка на ее краях динамических гасителей (рис. 1.41, *а*) в виде упругих элементов с салазками, стойками или колесами или навешивания на центральную секцию дополнительных колеблющихся масс m_1 при помощи упругого (C_1) и демпфирующего (K_2) элементов (рис. 1.41, *б*).

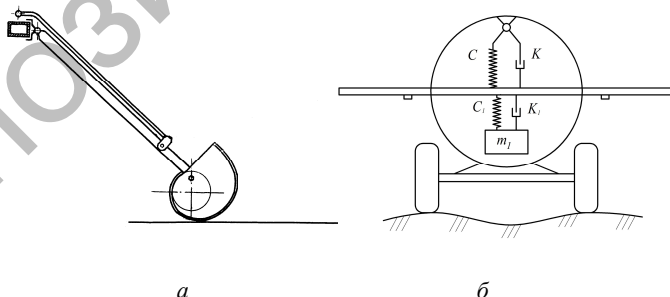


Рис. 1.41. Схемы динамических крайнего (*а*) и центрального (*б*) гасителей колебаний штанги

Действие виброизоляции сводится к ослаблению связей между источником возбуждения и объектом. В результате уменьшаются динамические воздействия, передаваемые объекту. При этом методе виброзащиты необходимо учитывать явление резонанса и при необходимости использовать демпфирование.

Для избегания поломки штанги от удара о поверхность поля на ее крайних секциях устанавливаются опорные колеса, полозья или салазки (рис. 1.42).

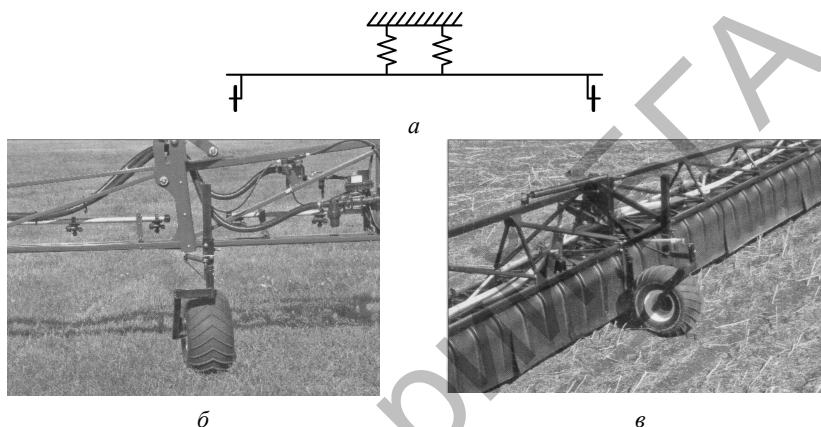


Рис. 1.42. Схема (а) и внешний вид (б, в) подвески штанги с опорными колесами-копирами GFS AG SHIELD [49]

На качество виброзащиты влияют многие факторы и параметры, поэтому повысить ее качество невозможно изменением лишь одного из них, а только оптимальным выбором всех параметров системы [13].

Для обеспечения равномерности распределения жидкости по ширине штанги должны иметь системы стабилизации (гашения колебаний, обеспечения плавности хода). Отсутствие данного устройства ведет к снижению качества опрыскивания. На хорошо выровненном поле амплитуда колебаний штанги длиной 10 м составляет 40 см при стандартной высоте установки штанги 50 см над обрабатываемой поверхностью.

Основным условием стабилизации является превышение собственной частоты рамы опрыскивателя над собственной частотой штанги. Собственная частота штанги, следовательно, и плавность

ее хода, может изменяться коэффициентами жесткости упругих связей и демпфирования, массой ее несущей конструкции либо совместно двумя этими путями.

Широкое применение в конструкциях опрыскивателей получили способы изменения коэффициентов жесткости упругих связей и демпфирования системы за счет использования пружин, амортизаторов, рессор, пневмогидроаккумуляторов, пневморессор и др.

Для стабилизации штанги опрыскивателя чаще всего используется центральная маятниковая подвеска с демпфирующими (пружины, амортизаторы) элементами для стабилизации в вертикальной плоскости (азотные энергоаккумуляторы, пневматические или гидравлические амортизаторы) и амортизирующими элементами (фрикционные накладки и сайлент-блоки) – для стабилизации в горизонтальной.

Основное достоинство системы стабилизации маятникового типа заключается в том, что при колебаниях не происходит перекрытия смежных проходов. Однако при такой конструкции сложно выдержать высоту обработки, когда изменяется площадь обработки: образуются либо пропуски, либо перекрытия.

В опрыскивателях *KUHN* плавность хода штанги и гашение колебаний при движении по дороге и во время полевых работ обеспечивает параллелограммная подвеска, оснащенная газовыми амортизаторами.

Для обеспечения плавности хода штанги прицепные опрыскиватели *John Deere* имеют Z-образный параллелограммный механизм ее подъема с азотными аккумуляторами в комплексе с маятниковой системой подвески штанги, оборудованной газовыми амортизаторами и полиуретановыми подушками. Z-образный параллелограммный механизм обеспечивает максимальную близость штанги и бака при работе на любой высоте опрыскивания, что, в свою очередь, обеспечивает лучшую стабильность и лучшее распределение веса вдоль рамы опрыскивателя. При этом азотные аккумуляторы демпфируют колебания, оказываемые на подъемный механизм. Маятниковая система подвески штанги совместно с амортизаторами и полиуретановыми подушками максимально компенсирует вертикальные и горизонтальные колебания штанги.

В конструкциях прицепных и навесных опрыскивателей фирмы-изготовителя *Lemken* используется комбинированная система

Parasol (рис. 1.43): распределительная штанга 7 крепится к раме опрыскивателя 1 при помощи маятниковой подвески. Для плавности хода штанги в вертикальной плоскости используются резинометаллические буферы с горизонтальными боковыми направляющими 3, сменные элементы скольжения 2 и амортизаторы 4. Для демпфирования колебаний штанги в горизонтальной плоскости используются амортизаторы 1. Изменение рабочей высоты установки распределительной штанги осуществляется с помощью гидравлической системы с использованием роликово-тросового механизма 6.

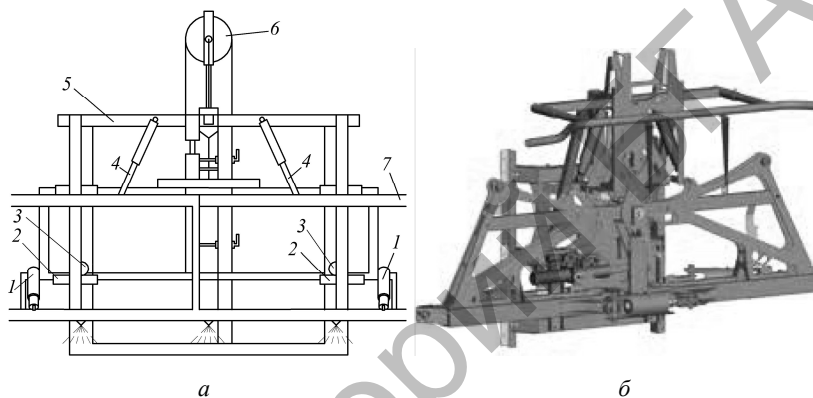


Рис. 1.43. Схема (а) подвески и внешний вид (б) системы стабилизации штанги опрыскивателя *Lemken*

Фирма-изготовитель *Amazone* большое внимание уделяет разработке и исследованию способов крепления штанги на раме опрыскивателя и систем ее стабилизации. В опрыскивателях *Amazone* вертикальная стабилизация осуществляется по принципу маятника с гашением колебаний гидроамортизаторами. Гашение горизонтальных колебаний осуществляется за счет демпфирующего узла, а также крепления секций штанги конусными шарнирами, которые полностью исключают колебания в сочленениях штанги.

В конструкциях опрыскивателей *Amazone* используется штанга 1 (рис. 1.44), состоящая из центральной и боковых частей, которые соединены между собой через шарниры. Боковые составляющие переводятся в транспортное и рабочее положения при помощи гидроцилиндров. Центральная часть несущей

конструкции распределительной штанги 1 крепится к рамке 2 опрыскивателя по принципу маятниковой подвески через пластину 4 и шарнир 3. Система стабилизации в вертикальной плоскости состоит из блока пружин растяжения 5 и амортизаторов 6. Изменение угла установки штанги 1 при работе на склонах осуществляется при помощи гидроцилиндра 8. В транспортном положении штанга 1 фиксируется стопорами 7 и 10. Для исключения раскачивания штанги 1 в горизонтальной плоскости применяются скользящий элемент 9, пружинный демпфер 11 и шарнир 12.

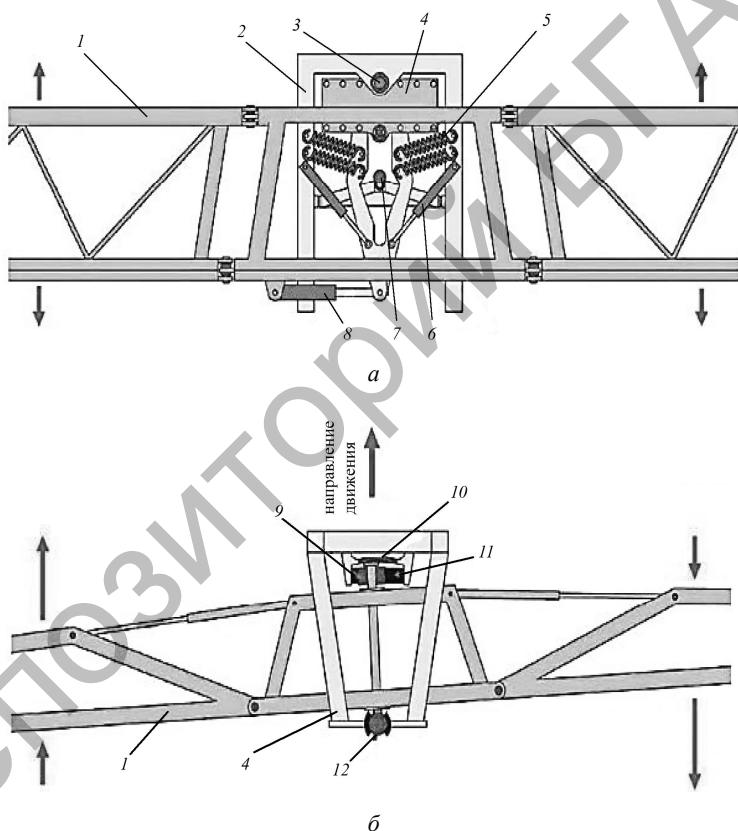


Рис. 1.44. Система навески штанги с системами стабилизации опрыскивателей *Amazona* в вертикальной поперечной (а) и горизонтальной (б) плоскостях

Система гашения колебаний штанги (рис. 1.45) [52] состоит из подвески 6, закрепленной на ползуне 5 с горизонтальной осью 4, на которую навешена центральная секция штанги 1. Штанга снабжена цилиндрическими роликами 2, охватывающими боковые вертикальные направляющие рамки 3 с двух противоположных сторон. Такое техническое решение сокращает частоту и амплитуду колебаний штанги в процессе работы опрыскивателя в полевых условиях, повышая тем самым его надежность. Ползун снабжен канатным приводом от гидроцилиндра для изменения высоты установки штанги. Уравновешивание центральной части штанги 1 осуществляется за счет пружин 8 и амортизаторов 7. Охватывание с обеих сторон боковых направляющих рамки цилиндрическими роликами, установленными на штанге, обеспечивает вероятность колебания штанги только в плоскости рамки и не дает возможности изменить положение штанги относительно шасси опрыскивателя, так как рамка жестко с ним связана. В результате штанга не может оставаться параллельной обрабатываемой поверхности при наезде одного колеса опрыскивателя на неровность.

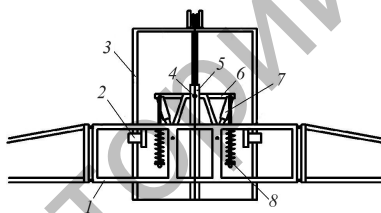


Рис. 1.45. Схема навешивания штанги с системой стабилизации

Система стабилизации штанги, применяемая фирмой *Hardi*, представляет собой маятниковый механизм (рис. 1.46) [52], причем штанга 4 опирается на центральный кронштейн 5 подвески через блок пружин 6, тем самым имея возможность колебаться в плоскости подвески, а центральный кронштейн 5, в свою очередь, крепится к рамке 1 при помощи горизонтальной оси 2 с возможностью совершать вращение на ней. Гашение колебаний, возникающих при работе, происходит с помощью гидравлических амортизаторов 3 и блока пружин 6. Данная система позволяет перемещаться штанге при работе во всех необходимых направлениях независимо от положения шасси опрыскивателя, исключая повышенные нагрузки на несущую конструкцию штанги и подвески, и сохранять рабочее положение на протяжении всего рабочего процесса.

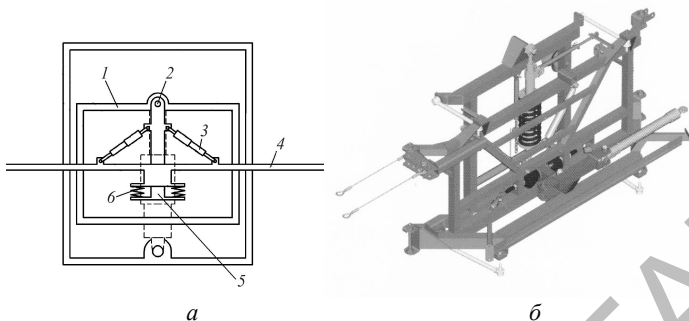


Рис. 1.46. Схема (а) подвески и внешний вид (б) системы стабилизации штанги опрыскивателя *Hardi*

Система стабилизации колебаний штанги (рис. 1.47) [38, 52] представляет собой маятниковый механизм. Подвеска 6 может вращаться в вертикальной плоскости на горизонтальной оси 7 и связана посредством пружин 2 с осью 1 колес опрыскивателя. На подвеске 6 на горизонтальной оси 8 закреплена штанга 10, уравнивание которой осуществляется при помощи пружин 4 и амортизаторов 3, связанных с балкой 5. Центральный гидроцилиндр 9 обеспечивает изменение угла наклона штанги в вертикальной плоскости, следовательно, позволяет использовать агрегат при работе на склонах. Данная система позволяет колебаться самой подвеске штанги и изменять свое положение относительно оси колес опрыскивателя. Выравнивается подвеска при помощи системы пружин, принимая горизонтальное положение, тем самым способствуя возвращению штанги в рабочее положение даже при наезде на крупные препятствия.

Возможности снижения коэффициентов жесткости упругих связей системы ограничены возникающими проблемами устойчивости и склонностью к параметрическому резонансу. Применение демпфирующих устройств с низкими коэффициентами жесткости обеспечивается искусственным увеличением массы центральной части несущей конструкции штанги, что позволяет сместить центр тяжести боковых конструкций к центру агрегата, облегчить их и снизить напряжения в элементарных сечениях по длине. Данные технические решения позволяют улучшить стабилизацию подвешенной системы.

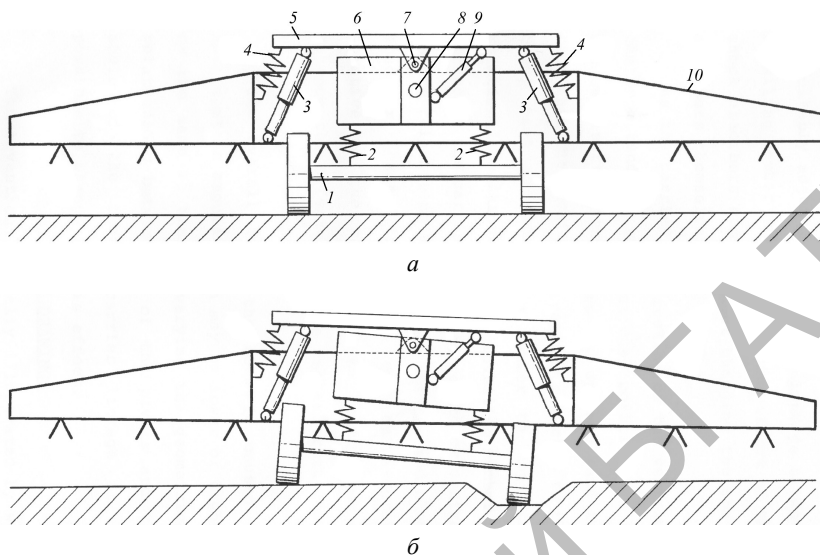


Рис. 1.47. Схема навешивания и система стабилизации штанги при движении по ровной (а) и невыровненной (б) поверхности

Достигается это тем, что штанга опрыскивателя содержит установленную на раме опрыскивателя несущую раму, с которой посредством двойных шарниров и растяжек секции штанги соединены с коллектором для распыления жидкости, и снабжена горизонтальными раскосами с упругими элементами, соединяющими ее секции с рамой опрыскивателя. На секциях штанги установлены амортизаторы, связанные с несущей рамой через шарниры, при этом каждая секция штанги выполнена из нескольких частей, крайняя из которых соединена с остальными через шарнир, ось которого расположена в горизонтальной плоскости перпендикулярно продольной оси штанги, а в месте сочленения крайних частей секции с остальными частями установлены упругие элементы, охватывающие их фиксаторы для ограничения угла поворота крайней части секции в вертикальной плоскости, размещенные относительно упругих элементов с возможностью образования зазора.

Штанга опрыскивателя (рис. 1.48, а, б) навешенная на несущую раму 1 при помощи двойных шарниров 2 и 21, растяжек 5 и амортизаторов 4, содержит боковые секции, состоящие (каждая) из шарнирно

связанных между собой промежуточной 7, средней 9 и крайней 12 частей. Промежуточная часть 7 боковой секции присоединена к несущей раме 1 через двойной шарнир 2, растяжку 5, снабженную упругим элементом 6 растяжки 5, и амортизатор 4. Растяжка 5 и амортизатор 4 присоединены к дополнительному двойному шарниру 3 на несущей раме 1. Средняя часть 9 боковой секции соединена с промежуточной 7 шарниром 8, ось которого вертикальная. Крайняя часть 12 боковой секции соединена со средней 9 шарниром 11, ось которого расположена в горизонтальной плоскости перпендикулярно продольной оси штанги. Средняя часть 9 боковой секции штанги в месте сопряжения с крайней частью 12 имеет упругий элемент 10, охватываемый фиксатором 11. В рабочем положении боковая секция фиксируется горизонтальным раскосом 15 с упругим элементом 16, соединяющим промежуточную часть 7 боковой секции с кронштейном 20 рамы опрыскивателя. На концах боковых секций установлены упоры 13. Коллекторы 17 штанги опрыскивателя могут иметь стойки 18, установленные в направляющих втулках 19, расположенных на секциях штанги.

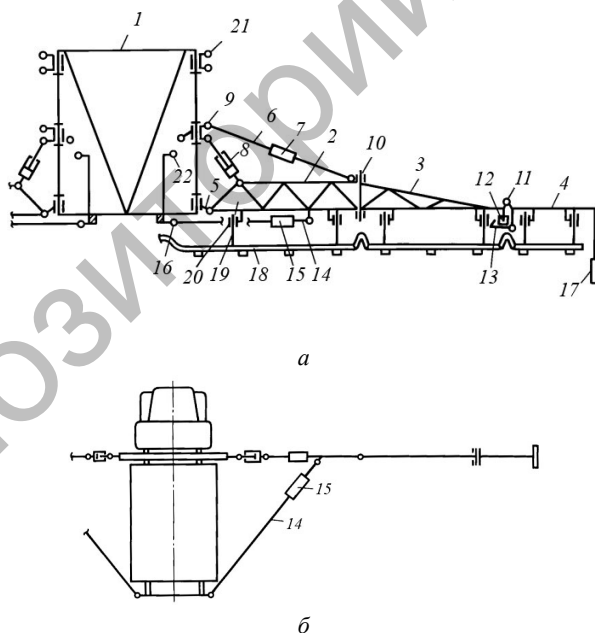


Рис. 1.48. Схема подвески штанги опрыскивателя [53]:
а – вид сзади; б – вид сверху

Несущая рама 1 может иметь не менее одного дополнительного двойного шарнира 3, которые расположены на разных высотах, и соответствующее им количество дополнительных двойных шарниров 2 несущей рамы 1, а также верхние кронштейны 22 рамы опрыскивателя для крепления горизонтальных раскосов 15 с рамой опрыскивателя.

Возможности снижения коэффициентов жесткости упругих связей системы ограничены возникающими проблемами устойчивости и склонностью к параметрическому резонансу [13]. Применение демпфирующих устройств с низкими коэффициентами жесткости обеспечивается искусственным увеличением массы центральной части несущей конструкции штанги, что позволяет сместить центр тяжести боковых конструкций к центру агрегата, облегчить их и снизить напряжения в элементарных сечениях по длине. Данные технические решения позволяют улучшить стабилизацию подвешенной системы.

Существуют несколько способов искусственного увеличения массы штанги, среди которых можно выделить установку в центральной ее части дополнительной массы (рис. 1.49, 1.50 а) или заполненной жидкостью емкости (рис. 1.50, б).

Идеи искусственного увеличения массы штанги реализованы в опрыскивателях фирмы *Jacto*. Несущая конструкция распределительной штанги 5 крепится по принципу шарнирно-рычажной А-образной подвески шарнирно к балке 4, закрепленной на раме 3 (рис. 1.49). Сама балка может передвигаться в плоскости рамки с помощью гидроцилиндра 2, тем самым изменяя высоту установки штанги над обрабатываемым объектом. В нижней части несущей конструкции штанги, находящейся за емкостью, установлен брус 6 большей массы, позволяющий искусственно увеличить массу центральной части штанги и тем самым сместить центр тяжести боковых ее составляющих в рабочем положении к центру агрегата, что позволяет снизить амплитуду колебаний, применив амортизаторы 4 с низким коэффициентом демпфирования.

Данная система надежна, проста и эффективна, однако при колебаниях в горизонтальной плоскости конструкция штанги испытывает повышенные нагрузки, и возникающие в этой плоскости колебания не гасятся.

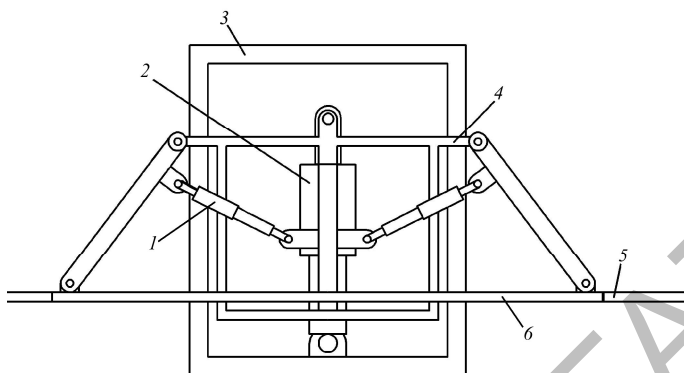


Рис. 1.49. Схема системы навески опрыскивателей Jacto

Для схемы подвески штанги 2 (рис. 1.50, а) резонансные колебания уменьшаются при помощи динамических гасителей 8, которые посредством упругого 1 и демпфирующего 7 элементов крепятся к середине штанги 2. При этом сама штанга 2 посредством упругого 3 и демпфирующего 6 элементов через шарнир навески 5 соединена с несущей рамой 4. В данной конструкции эффект гашения колебаний заключается в том, что масса 8 покачивается в противофазе колебаниям, передающимся штанге через раму опрыскивателя.

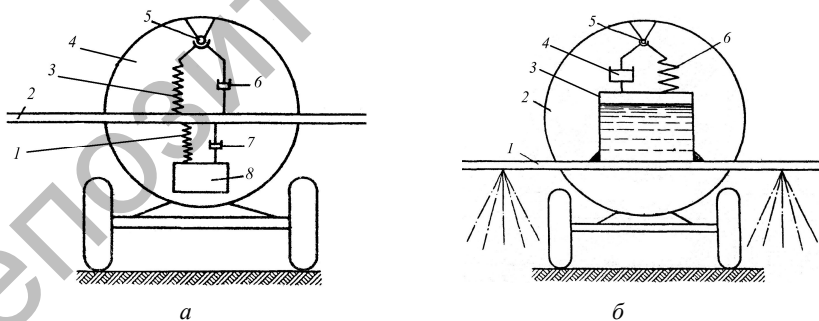


Рис. 1.50. Схемы системы искусственного увеличения массы штанги

Во втором случае штанга 1 (рис. 1.50, б), снабженная дополнительной, заполненной жидкостью емкостью 3, крепится на шарнире 5 навески емкости 2 через упругий пружинный элемент 6

и демпфирующий элемент 4. Заполнением дополнительной емкости жидкостью подбирается общая масса штанги, которая обеспечила бы ее собственную частоту ниже собственной частоты рамы опрыскивателя. Демпфирующий элемент 4 служит для успокоения системы от возмущений емкости 2 и жидкости при неполном заполнении емкости 3. При этом колеблющаяся в емкости 3 жидкость выступает в роли динамического поглотителя.

Ввиду сложности конструкции, перенастройки системы в связи с постоянным опорожнением емкости, а также сложностями стабилизации штанги при работе на склонах данные конструкции широкого применения не нашли.

При этом следует отметить влияние степени заполнения основной емкости опрыскивателя на параметры колебаний штанги.

В процессе расходования рабочей жидкости изменяется полная масса опрыскивателя. При этом диапазон ее изменения может почти в 2 раза превышать собственную массу опрыскивателей без жидкости [54]. Это влияет на положение центра масс опрыскивателя и на процесс колебаний подвески штанги, следовательно, на качество распределения рабочей жидкости по обрабатываемой поверхности (рис. 1.51).

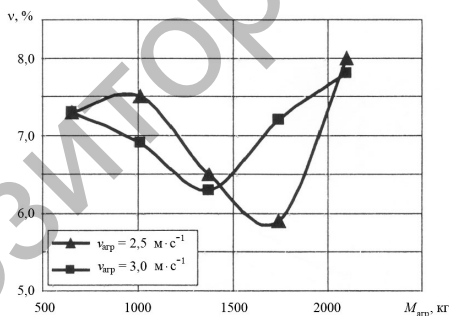


Рис. 1.51. Графики влияния массы опрыскивателя и рабочей скорости движения на коэффициент вариации распределения рабочей жидкости по ширине захвата

Результаты, представленные в работе [38], учитывают не только изменения массы опрыскивателя, но и колебания рабочей жидкости в основной емкости во время движения агрегата на параметры колебаний подвески штанги. Влияние колебаний рабочей жидкости

на параметры колебаний штанги снижаются установкой дополнительных поверхностей в основной емкости (рис. 1.52, а, б) [13, 55, 56], которые позволяют гасить колебания жидкости. Предполагается, что связанные с подвеской штанги и установленные в основной емкости поверхности, выполненные в форме пластин, позволяют не только гасить колебания рабочей жидкости, но использовать энергию колебаний штанги для поддержания установленной концентрации рабочей жидкости путем перемешивания поверхностями пластин. Однако широкого практического применения данные разработки не нашли вследствие изменения условий работы агрегатов на склонах и на полях с различным рельефом.

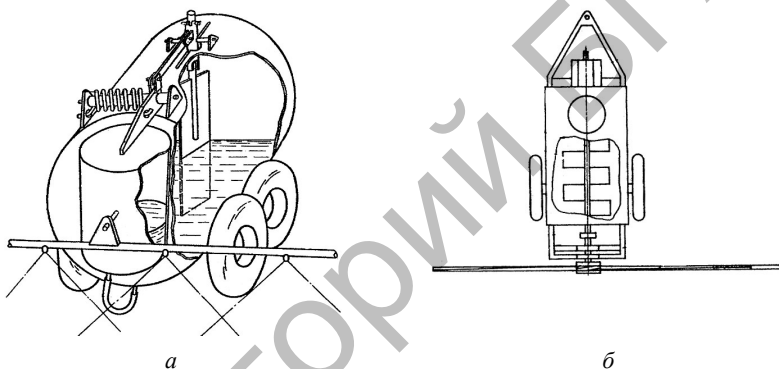


Рис. 1.52. Схемы устройств для гашения колебаний жидкости в основной емкости опрыскивателя и использования энергии колебаний штанги

Недостатками большинства систем стабилизации являются: колебания штанги большой амплитуды, которые вызваны тем, что масса штанги в сравнении с массой опрыскивателя невелика, в результате чего не удается сразу погасить колебания; невозможность нормальной работы демпфирующих устройств при одновременном наезде двух колес на препятствия; отсутствие систем, обеспечивающих мгновенное гашение колебаний в горизонтальной плоскости. Кроме того, подвески штанг имеют колебания низкой частоты 2...5 Гц [13]. При гашении частота колебаний штанги приближается к частоте колебаний подвески, то есть может возникнуть резонанс. Особенно это возможно при условии полного заполнения основной емкости опрыскивателя рабочей жидкостью.

Конструктивная схема штанги с системами подъема, стабилизации и изменения угла наклона представлена на рис. 1.53. Она включает в себя механизм подъема параллелограммного типа 9, штангу 4 электрогидрораспределитель 3, пневмогидроаккумулятор 6, амортизаторы 1, гидроцилиндры подъема 10, гидроцилиндры раскладывания штанги 5, гидроцилиндры фиксации штанги 8, гидроцилиндр наклона штанги 2.

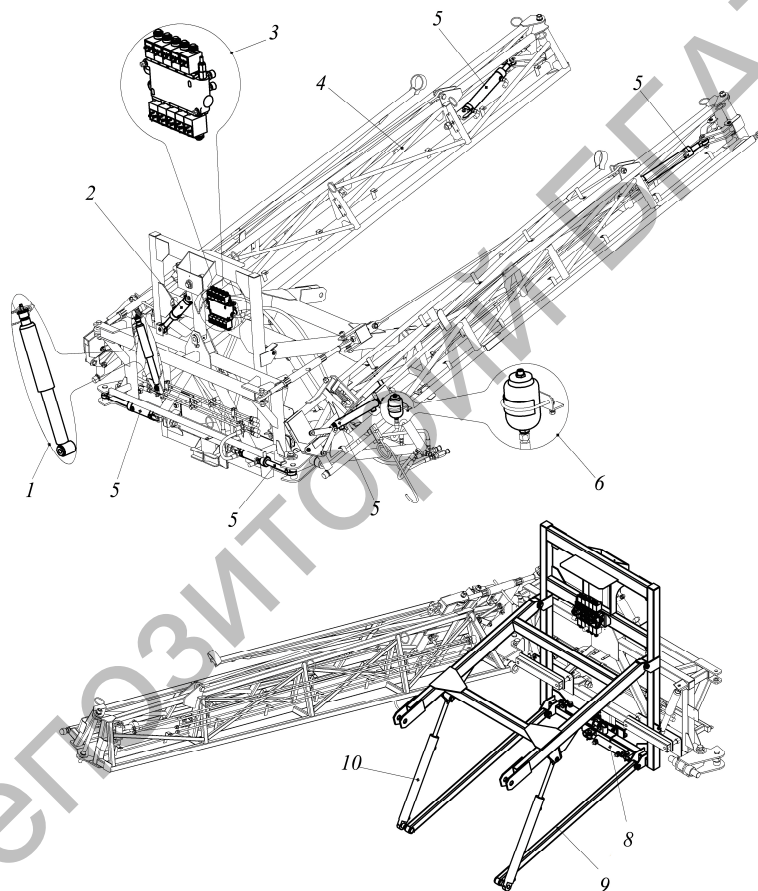


Рис. 1.53. Конструктивная схема штанги с системами подъема, стабилизации и изменения угла

Перевод штанги из транспортного положения в рабочее (и наоборот) осуществляется с помощью гидроцилиндров складывания 5, регулировка высоты опрыскивания – гидроцилиндрами 10. При работе на склонах возможен наклон штанги для более полного копирования рельефа. Штанга, оборудованная маятниковой подвеской, менее подвержена воздействию колебаний, передающихся от опрыскивателя при движении по полю. Гидроцилиндры на штанге могут объединяться в гидросистему, которая имеет возможность управляться как гидрораспределителем трактора, так и иметь автономный гидрораспределитель (преимущественно с электрическим управлением).

Для гашения ударных нагрузок при движении опрыскивателя по полю во время работы штанга оборудуется системами гашения колебаний в горизонтальной и вертикальной плоскостях, в которых используются упругие элементы: пневморессоры (рис. 1.54), амортизаторы, пневмогидроаккумулятор, пружины.



Рис. 1.54. Пневморессора

Недостаток многих устройств заключается в неравномерном распределении жидкости из-за применения штанги, система подвески секций которой допускает их горизонтальные колебания и дополнительные вертикальные колебания, конструктивно возникающие от растяжек подвески секций, помимо колебаний, обусловленных передвижением устройства по неровной поверхности.

Система подвески штанги может приводить к слабому и длительному затуханию колебаний секций, что усугубляет неравномерность распределения жидкости.

Кроме того, вследствие неточного изготовления и установки узлов и элементов штанги и системы стабилизации, возникают

дополнительные степени свободы в направляющих рамы опрыскивателя, где установлена штанга или ее подвеска, и в шарнирах складывания. Поэтому растет амплитуда колебаний концов секций, ограничивая высоту обработки и снижая надежность конструкции из-за возможных повреждений штанги при ударе о поверхность почвы, увеличивается неравномерность распределения жидкости, ограничивая также ширину захвата, не позволяя устанавливать штангу на низкой высоте.

Недостатками некоторых подвесок является передача возмущающих толчков и колебаний от машинного агрегата непосредственно на штангу, ее низкая виброзащищенность, длительное затухание колебаний, возможность повреждения штанги при ударах крайних секций о поверхность поля.

Задачами подвесок, систем стабилизации штанг и гашения колебаний является повышение виброзащищенности штанги и подвески опрыскивателя, повышение их надежности и долговечности, улучшение стабилизации, плавности хода штанги, быстрое гашение возникающих колебаний и поддержание штанги параллельно поверхности поля при обработках неровных и наклонных участков. Следует отметить, что большинство приведенных схем систем навешивания штанги основаны на использовании самой простой маятниковой подвески, которая позволяет эффективно стабилизировать штангу в вертикальной плоскости и обеспечивать параллельность ее расположения при движении опрыскивателей по неровной поверхности поля.

На начальной стадии возникновения возмущений от копирования колесами микронеровностей поля гашение динамических нагрузок осуществляется шинами (рис. 1.55) и навеской ходовой системы (рис. 1.56, *а, б*). Конструкцию и параметры элементов данных подвесок выбирают таким образом, чтобы обеспечивалось эффективное гашение возмущений при изменяющейся массе опрыскивателя (опорожнении основной емкости). При использовании элементов с необоснованными параметрами могут возникать случаи, когда подвеска эффективна при полной емкости, а при пустой – становится источником дополнительных вибраций машины. Так, при установке между осью ходовой системы и емкостью опрыскивателя рессоры с жесткостью, обеспечивающей плавный ход опрыскивателя с полной емкостью, был отмечен высокий уровень ускорений рамы при движении с пустой емкостью [13].



Рис. 1.55. Опрыскиватель с высокой степенью гашения колебаний штанги подвески ходовой системы и шинами

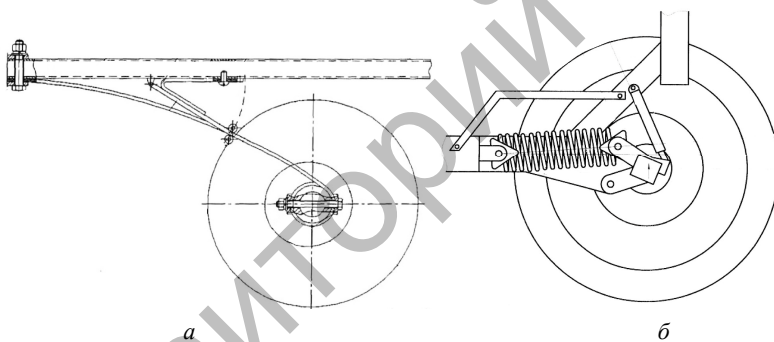


Рис. 1.56. Схема подвесок колес опрыскивателей [57, 58]

Шарнирно-рычажные подвески, в зависимости от положения точки пересечения осей наклоненных тяг, имеют А- и V-образную форму. А-образная подвеска устойчивее и эффективнее для изоляции штанги от колебаний при движении опрыскивателя по ровной поверхности, V-образная – наоборот, поэтому ее рекомендуется использовать при работе на склонах [36, 38].

Способ навешивания штанги (рис. 1.57) на раму опрыскивателя определяет конструкцию механизма изменения высоты ее установки относительно обрабатываемой поверхности.

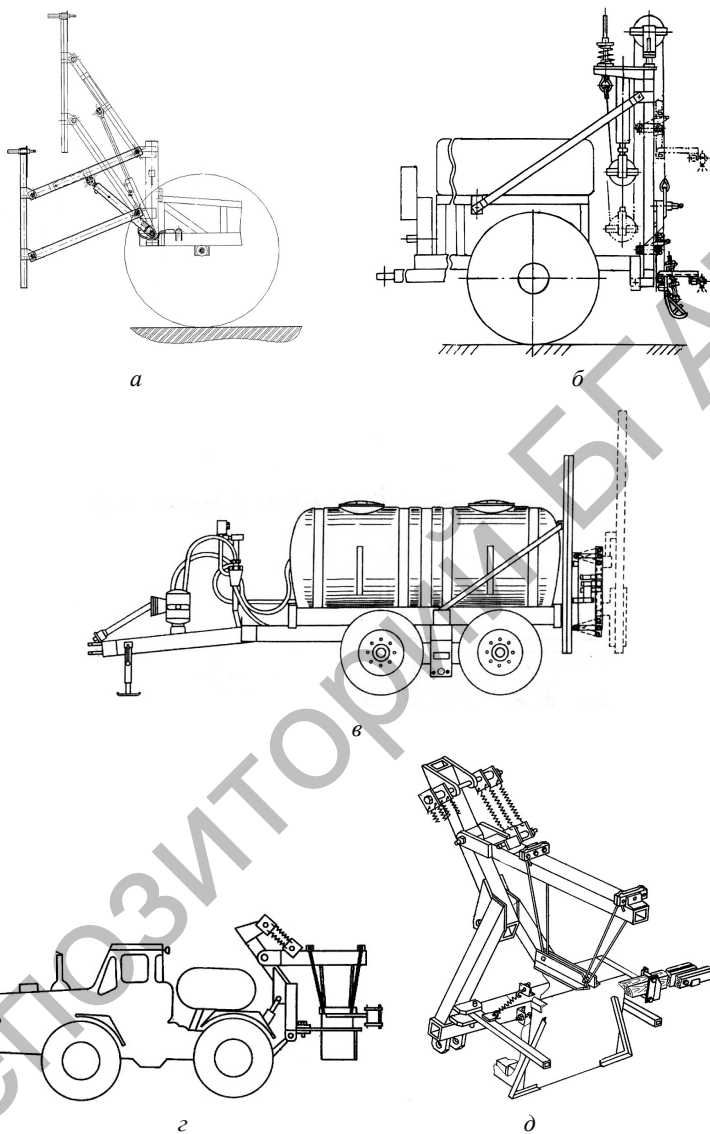


Рис. 1.57. Схемы навешивания штанг опрыскивателей:
а – параллелограмная [59]; *б* – тросо-блочная [60]; *в* – непосредственно
 в направляющих рамы [38]; *г, д* – маятниковая подвеска в виде стойки
 с рычагом [61]

В конструкциях штанг предусматриваются элементы (рис. 1.58–1.60), позволяющие избежать поломки их несущих конструкций при встрече с препятствиями или ударе о поверхность поля во время выполнения технологической операции опрыскивания. Данные элементы позволяют отклоняться крайней секции штанги вверх или назад и возвращаться в исходное положение.

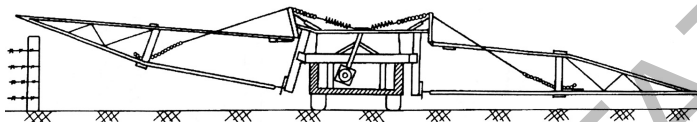


Рис. 1.58. Схема маятниковой рычажной подвески с упруготросовой системой поднятия крайних секций для объезда препятствий [38]

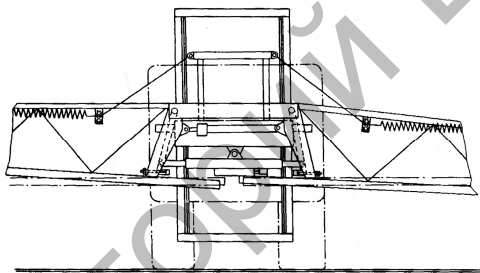


Рис. 1.59. Схема маятниковой многошарнирной (А-образной) подвески с посекционным регулированием и упруготросовой системой поднятия крайних секций для объезда препятствий [38]

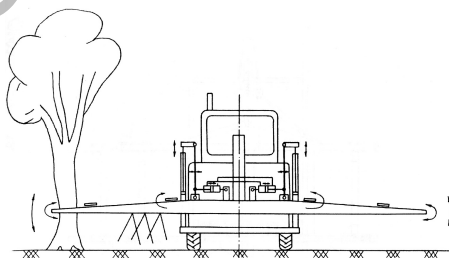


Рис. 1.60. Схема активной регулируемой подвески с посекционным подъемом и поворотом штанги при объезде преград во время работы [38]

При работе агрегата на больших рабочих скоростях и установке штанги низко над обрабатываемой поверхностью возможен случай возникновения вынужденных колебаний большой амплитуды, что приводит к вероятности удара края штанги о почву. Чтобы в результате удара краев штанги о поверхность поля не произошла поломка несущей конструкции, на крайних секциях устанавливаются динамические гасители колебаний (ДГК) (рис. 1.61).

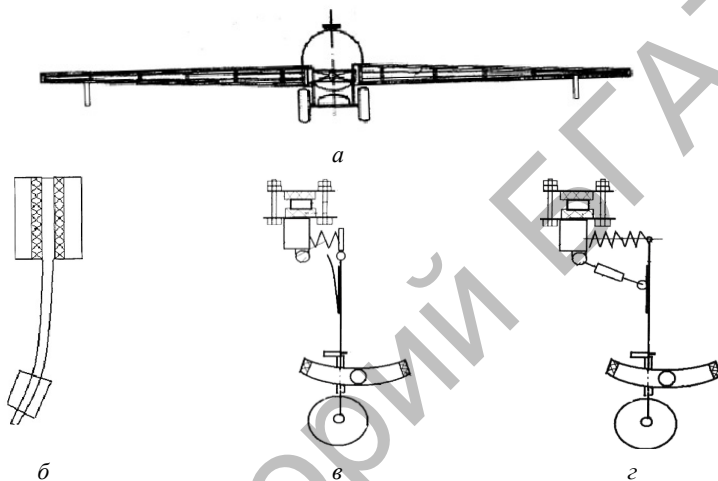


Рис. 1.61. Схемы ДГК:

a – места установки ДГК на штанге [62]; *б, в, г* – конструкции ДГК [62, 63, 64]

На рис. 1.62 приведены простейшие схемы маятниковых подвесок штанг опрыскивателей.

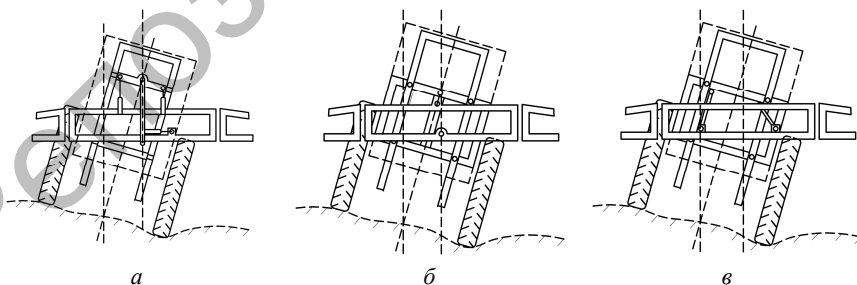


Рис. 1.62. Схемы маятниковых подвесок штанги опрыскивателей [38]:

a – одношарнирная; *б* – трехшарнирная; *в* – четырехшарнирная

Наиболее практичной выглядит четырехшарнирная маятниковая подвеска (см. рис. 1.62, *в*), которая позволяет при небольших размерах реализовать эффективную длину маятника – расстояние между центром тяжести системы и идеальной точкой пересечения обоих рычагов подвески. Большая длина маятника позволяет быстрому возвращению штанги в устойчивое положение в горизонтальной плоскости и уменьшает колебания в вертикальной. Маятниковую подвеску рекомендуется применять при ширине штанг 9 м [38].

Использование различных упругих и демпфирующих элементов в системе стабилизации штанги, параметры и места их установки определяются способом навешивания штанги на раму опрыскивателя (рис. 1.63).

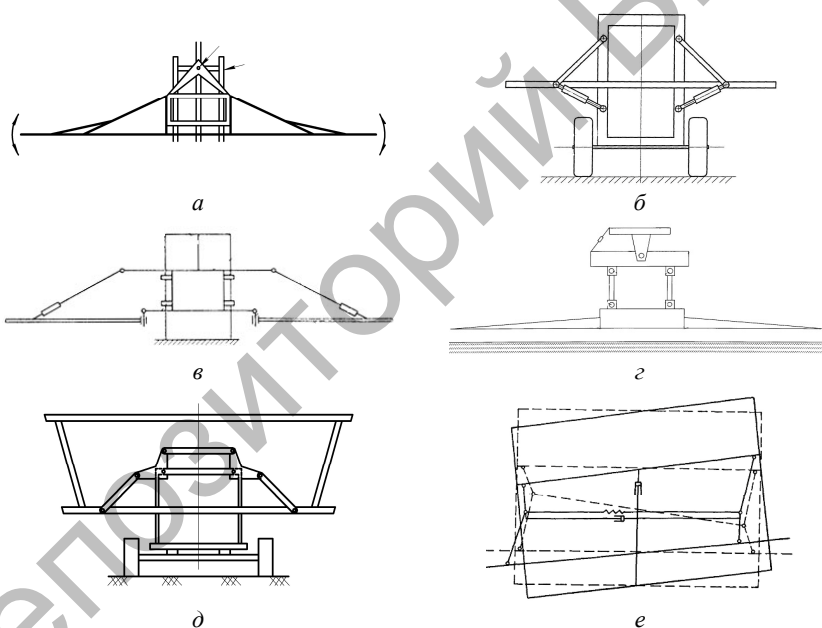


Рис. 1.63 . Простые подвески штанг опрыскивателей:
а – маятниковая одношарнирная [38]; *б* – А-образная с демпфирующими элементами [65]; *в* – маятниковая с растяжками [66]; *з* – пятишарнирная маятниковая с механизмом изменения угла наклона штанги [67];
д – маятниковая (А-образная) [38]; *е* – маятниковая с пространственной системой гашения колебаний [68]

Существуют способы установки штанги на криволинейные (рис. 1.64, *а-д*, 1.65, *а-в*) и прямолинейные опорные поверхности. Данный способ позволяет изменять угол установки штанги перемещением ее относительно точки опорной поверхности либо поворотом самой опорной поверхности. При этом смещается центр тяжести штанги, и она изменяет свой угол наклона по отношению к горизонту.

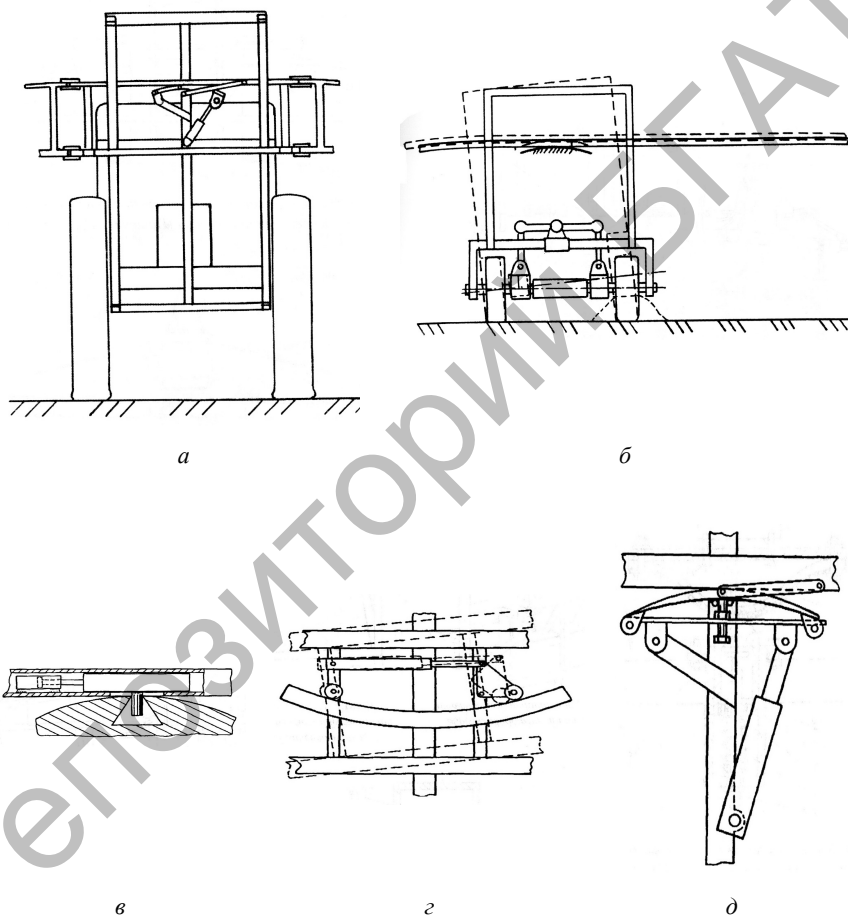


Рис. 1.64. Схемы маятниковых регулируемых подвесок навешиваемых штанг с криволинейными опорными поверхностями (*а, б*) и механизмом изменения угла установки (*в, г, д*) [38]

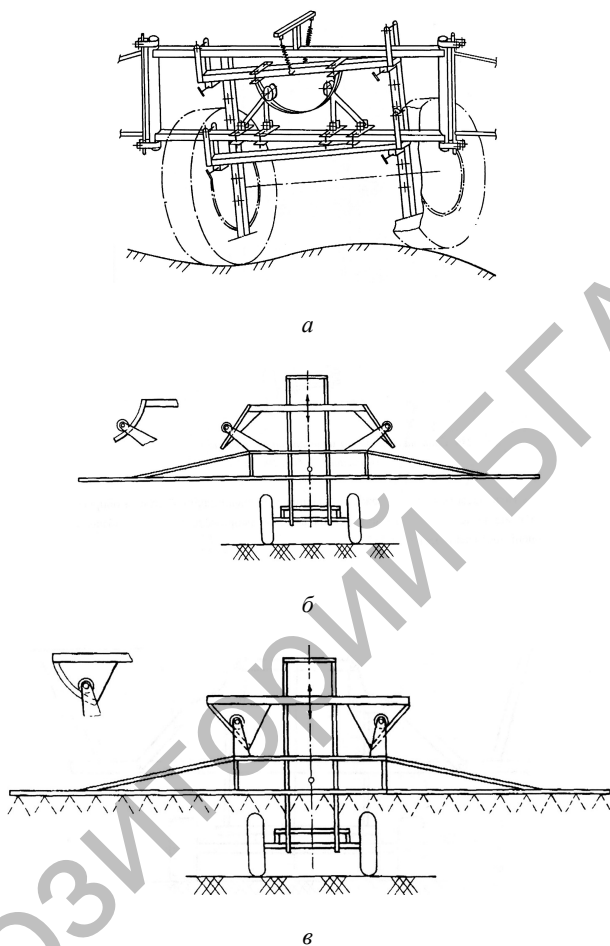


Рис. 1.65. Подвески штанг опрыскивателей с криволинейной опорной поверхностью [38]

В конструкциях опрыскивателей используются устройства, копирующие рельеф поля, которые поддерживают штангу на заданной высоте обработки (соблюдение условия постоянства расстояния между распылителями и обрабатываемой поверхностью). При этом исключаются колебания штанги, и обеспечивается надежность ее несущей конструкции (рис. 1.66).

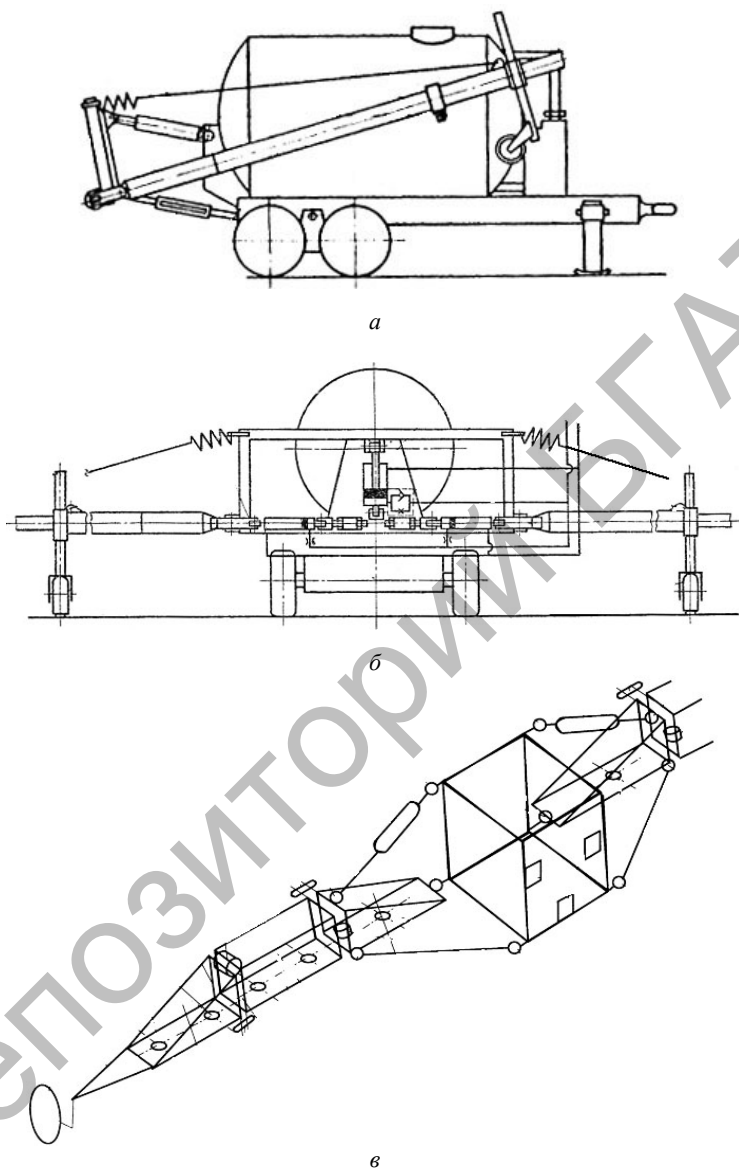
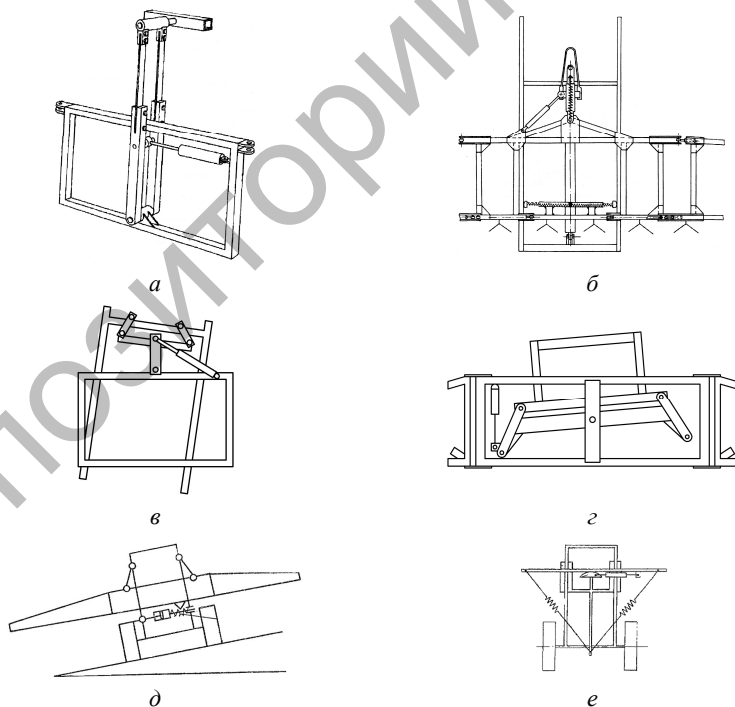


Рис. 1.66. Штанги опрыскивателя с маятниковой навеской и дополнительными опорными колесами для копирования рельефа поля в транспортном (а) и рабочем (б, в) положениях [69, 70]

Обычная одношарнирная маятниковая подвеска штанги для работы на склонах не может быть использована, так как не обеспечивает соблюдение условия ее параллельности обрабатываемой поверхности поля. Штанга с А-образной маятниковой подвеской на склоне занимает промежуточное положение между горизонтом и обрабатываемой поверхностью, поэтому ее положение необходимо корректировать или использовать механизм блокировки. Для изменения угла установки штанги, с целью обеспечения одинакового расстояния между обрабатываемой поверхностью и штангой, используются механизмы с ручным, механическим, гидравлическим, пневматическим и электрическим приводами.

Для качественной обработки полей со сложным рельефом необходимо изменять угол наклона всей штанги (рис. 1.67) или одного ее крыла (рис. 1.68). При этом используемая система стабилизации должна обеспечить плавность хода штанги и постоянства расстояния между распылителями и обрабатываемой поверхностью по ширине захвата каждого крыла.



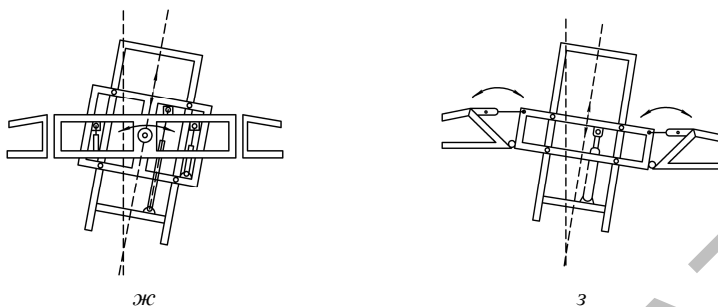


Рис. 1.67. Схемы подвесок с механизмом изменения угла наклона штанги: *a* – маятниковая регулируемая с плоскими пружинами [38]; *b* – маятниковая одношарнирная упруго-регулирующая [38]; *в* – маятниковая А-образная с выравнителем [38]; *г* – маятниковая трехшарнирная (А-образная) [38]; *д* – маятниковая управляемая А-образная [72]; *е* – управляемая с криволинейной опорной поверхностью [71]; *ж* – свободная центральная [38]; *з* – трехшарнирная, с независимой регулировкой боковых секций [38]

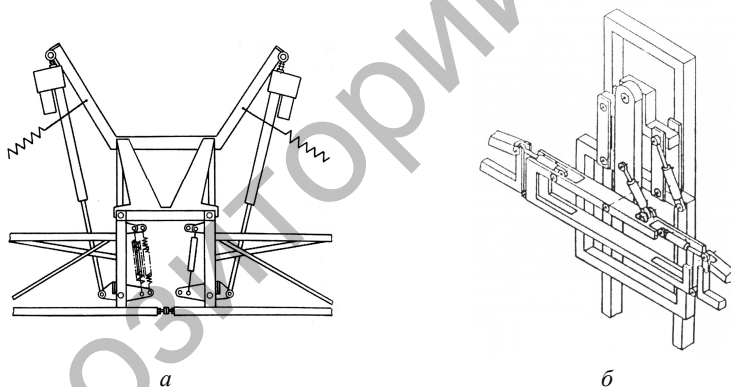


Рис. 1.68. Схемы маятниковых подвесок с механизмами независимого изменения угла наклона правого и левого крыльев штанги [38]: *a* – упруго-шарнирно-рычажная регулируемая; *б* – с гидравлическим управлением

Для эффективного гашения колебаний штанг, подвешенных к раме опрыскивателя с использованием маятниковой навески, существует большое множество систем гашения колебаний в горизонтальной и вертикальной плоскостях с использованием различных сочетаний упругих и демпфирующих элементов (рис. 1.69–1.75).

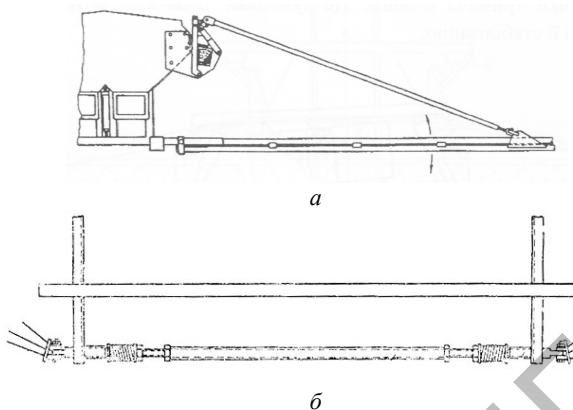


Рис. 1.69. Схемы систем стабилизации штанги в горизонтальной плоскости (гашение колебаний штанги в направлении движения агрегата) [73]

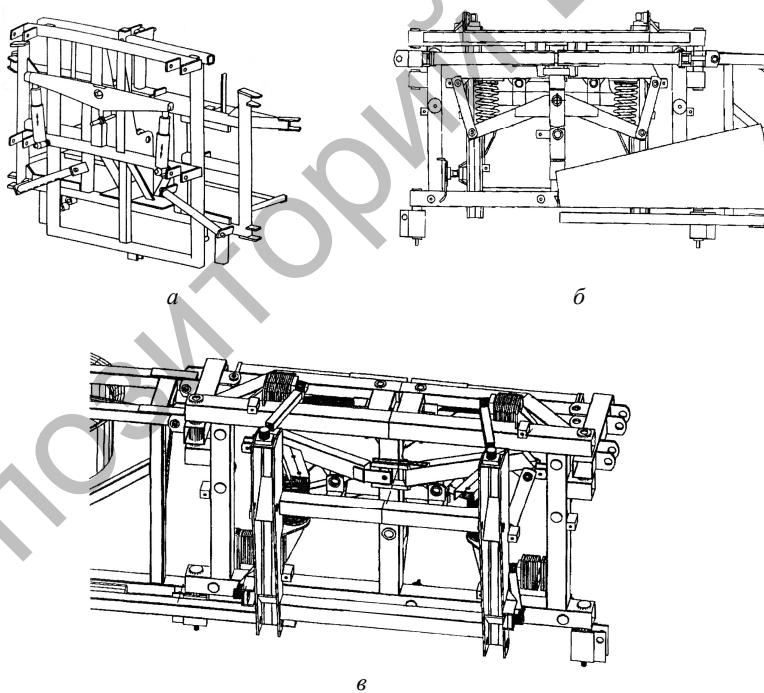
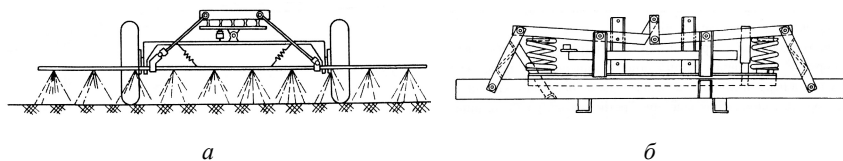
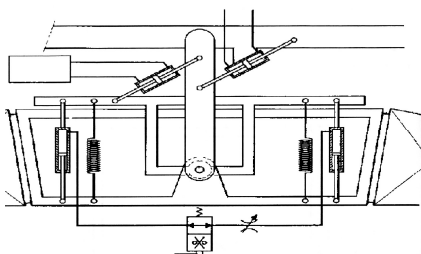


Рис. 1.70. Схемы маятниковых подвесок штанг с системами стабилизации [38]:
 а – одношарнирная; б – пружинная V-образная; в – сложная

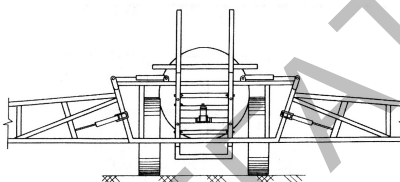


a

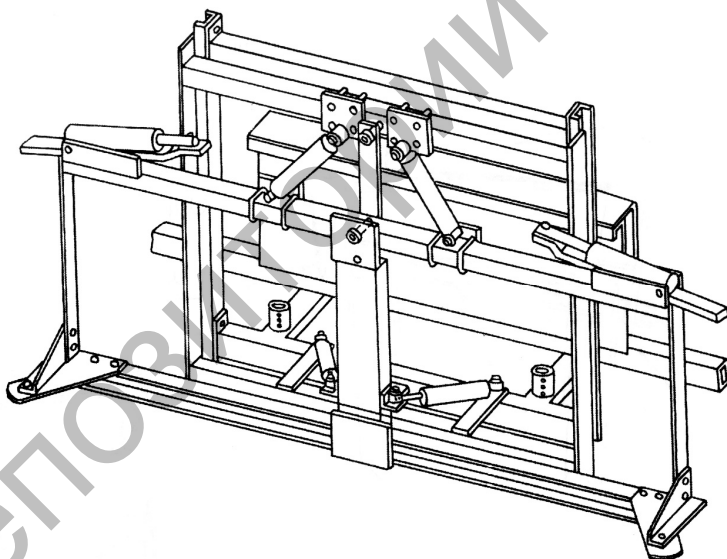
б



в



г



д

Рис. 1.71. Схемы маятниковых подвесок штанг с системами стабилизации [38]:
a – пружинно-демпфирующая; *б* – шарнирно-рычажная пружинная;
в – пружинная V-образная *г* – двухшарнирная; *д* – активная с горизонтальными
и вертикальными регулировками

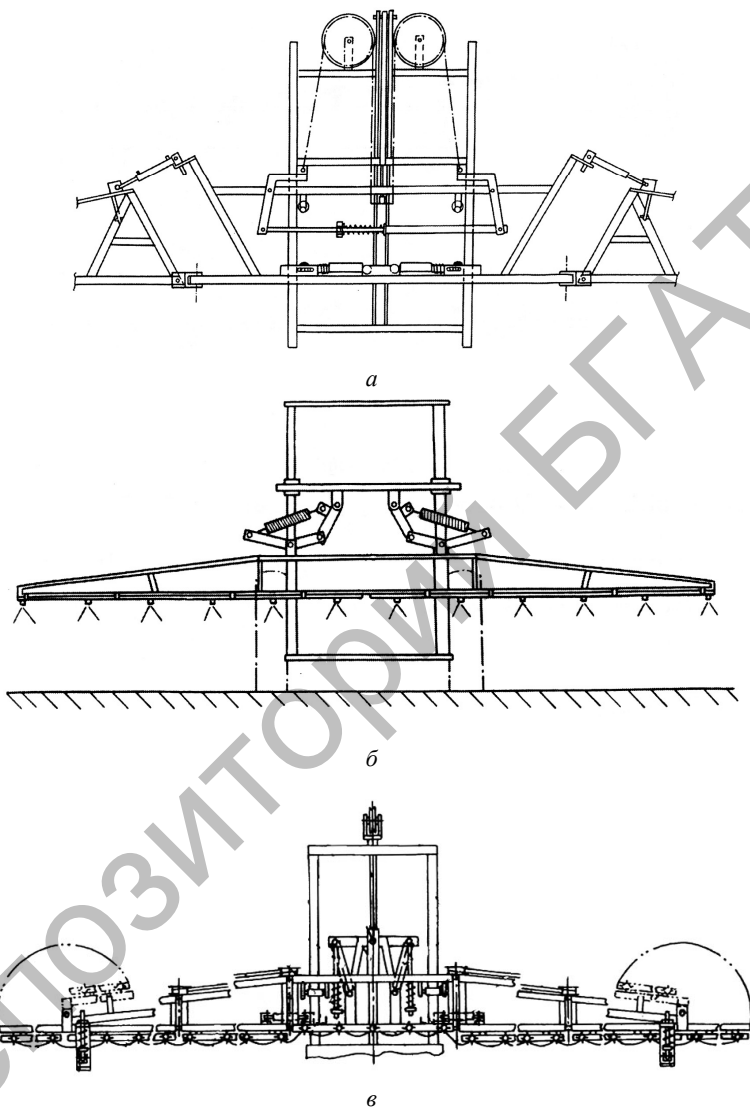


Рис. 1.72. Схемы маятниковых подвесок штанг с системами стабилизации:
 а – регулируемая полиспастовая [38]; б – пружинно-коромысловая
 (А-образная) [38]; в – регулируемая V-образная с механизмом защиты
 штанги от удара [60]

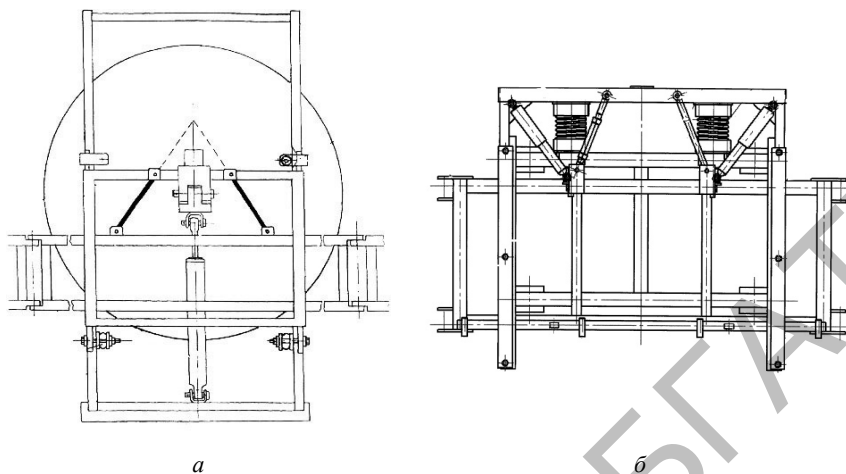


Рис. 1.73. Схемы маятниковых подвесок штанг с системами стабилизации:
 а – шарнирно-рычажная (А-образная) [74]; б – шарнирно-рычажная
 пружинная (А-образная) [75]

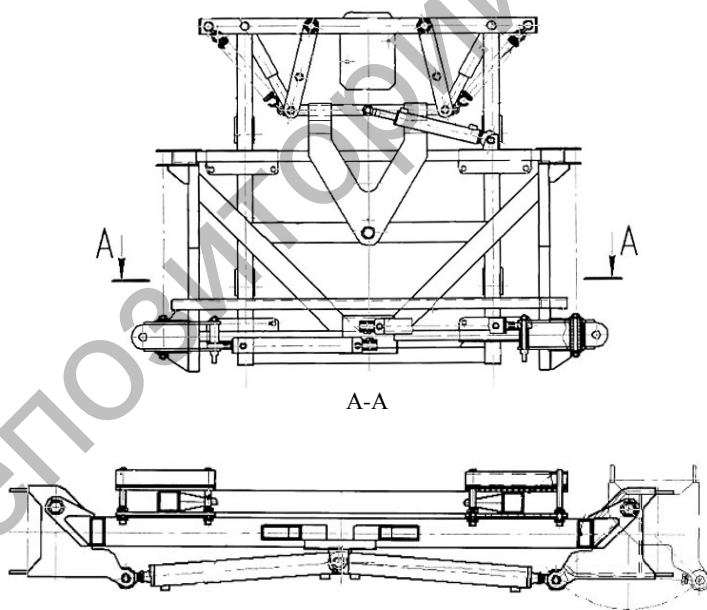


Рис. 1.74. Схема маятниковой подвески штанги
 с системами стабилизации [76]

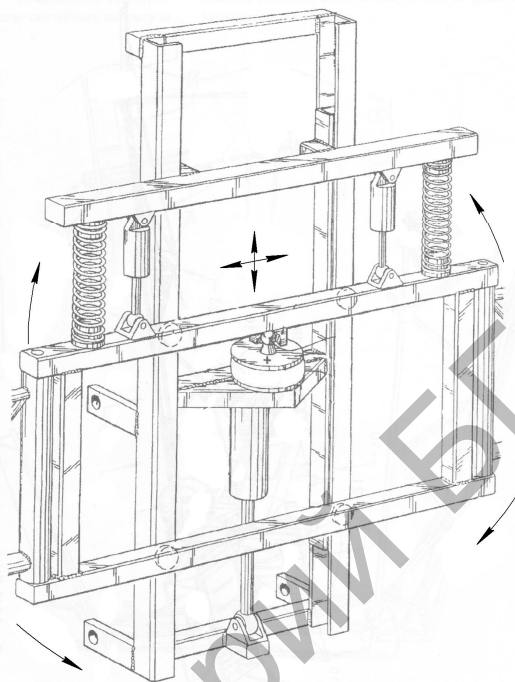


Рис. 1.75. Схема двухшарнирной маятниково-пружинной подвески с пространственной системой стабилизации [38]

К возникновению колебаний штанги также приводят зазоры в сочлененных деталях (шарнирах складывания секций, деталях системы стабилизации и др.), поэтому дополнительно в таких узлах устанавливаются упругие элементы (рис. 1.76).

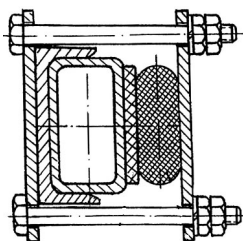


Рис. 1.76. Схема установки дополнительного упругого элемента [75]

В конструкциях современных опрыскивателей используются пространственные системы стабилизации, позволяющие эффективно гасить колебания в вертикально-поперечной, вертикально-продольной и горизонтальной плоскостях движения агрегата.

В конструкциях опрыскивателей, производимых в Украине, широко используются различные способы навешивания штанги и системы стабилизации штанги (рис. 1.77–1.81). Основными элементами гашения колебаний в данных опрыскивателях являются рессоры, пружины сжатия и амортизаторы.

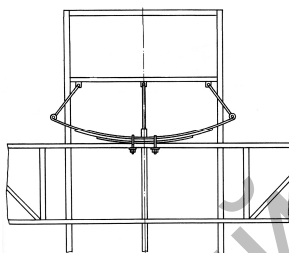


Рис. 1.77. Схема маятниково-рессорной навески штанги опрыскивателя [38]

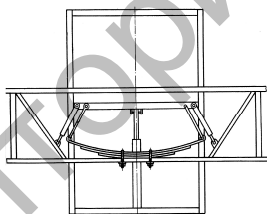


Рис. 1.78. Схема маятниково-рессорной навески с амортизатором штанги опрыскивателя [38, 76]

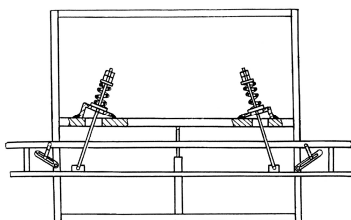


Рис. 1.79. Схема пружинной А-образной маятниковой навески штангового опрыскивателя [38, 77]

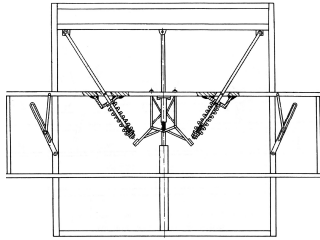


Рис. 1.80. Схема пружинной V-образной маятниковой навески штанги опрыскивателя [38, 78]

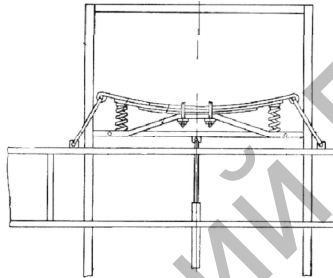


Рис. 1.81. Схема маятниково-рессорной навески с кронштейном штанги опрыскивателя [39]

На основании выполненного анализа конструкций подвесок и систем стабилизации штанг опрыскивателей следует отметить, что большинство разработок направлены на решение задач эффективного гашения колебаний в одной из плоскостей движения агрегата.

Решение комплексной проблемы пространственной стабилизации штанги требует существенного усложнения конструкции опрыскивателя.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ШТАНГИ ПОЛЕВОГО ОПРЫСКИВАТЕЛЯ

Теоретические основы колебаний широко представлены в работах В. Л. Бидермана, Я. Г. Пановко, А. А. Яблонского, С. П. Тимошенко, Д. Х. Янга, У. Уивера [91–95]. Исследованиям процессов колебаний и обеспечения надежности штанг полевых опрыскивателей посвящены труды Я. Г. Озолса, В. А. Бумажкина, К. Э. Вартукаштейниса, Т. И. Рыбака, В. В. Кузнецова и др. [96–99]. Наиболее полно исследования процессов гашения колебаний штанг опрыскивателей, обоснования способов их навешивания и выбора систем стабилизации представлены в трудах И. А. Виковича [38, 100–102], долговечности и надежности несущих конструкций – в трудах Т. И. Рыбака [97].

2.1. Особенности использования различных математических моделей для исследований процесса колебаний штанги полевого опрыскивателя

Несущая конструкция штанги опрыскивателя связана с корпусом машины таким образом, что деформации ее точек зависят от неровности поля, ветрового потока и равномерности скорости потока жидкости внутри трубопроводов. В зависимости от учета данных условий, колебания штанги могут описываться различными математическими моделями [91–95], поэтому целесообразно рассмотреть некоторые из них.

2.1.1. Модель колебаний штанги при движении опрыскивателя по ровной поверхности

Свободные колебания штанги могут возникнуть на ровной поверхности участков поля и при отсутствии других возмущающих факторов.

Рассмотрим поперечные колебания штанги, предполагая, что длина штанги намного больше размеров ее поперечного сечения и движение происходит в одной плоскости, то есть все точки штанги

движутся перпендикулярно к оси Ox . Очевидно, что на практике данные колебания будут малы. Тогда смещения точек $u(x, t)$ и их производные будут столь малы, что их квадратами и произведениями можно пренебречь. При этом можно считать, что упругие силы сжатия (растяжения) точек и штанги велики. Если в начальный момент штанга занимает горизонтальное положение и находится в недеформируемом состоянии (рис. 2.1, положение точек x_1, x_2), то в процессе малых колебаний данный участок штанги деформируется в участок B_1B_2 , длина которого определится из уравнения [94]:

$$L = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{1 + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}} dx.$$

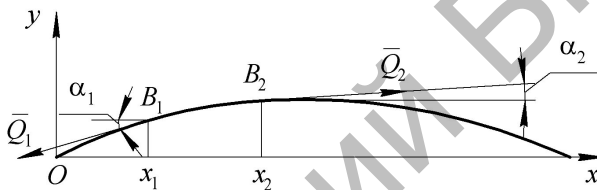


Рис. 2.1. Схема растягивающих сил на поверхности штанги

В силу сделанных предположений о малости колебаний имеем

$$L \approx x_2 - x_1,$$

то есть штанга фактически не имеет удлинений.

Рассмотрим системы сил, действующих на точки B_1 и B_2 . На участок штанги B_1B_2 будут действовать силы упругости \bar{Q}_1 и \bar{Q}_2 в точках B_1 и B_2 , а также силы инерции и силы тяжести, которые в случае поперечных колебаний будут направлены параллельно оси y . Тогда уравнение равновесия, записанное на ось Ox , будет таким:

$$Q_1 \cos \alpha_1 - Q_2 \cos \alpha_2 = 0,$$

где α_1, α_2 – соответственно, углы между поверхностью штанги и силами Q_1, Q_2 .

В силу малости углов имеем:

$$\cos \alpha_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_1}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}}} \approx 1;$$
$$\cos \alpha_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}}} \approx 1.$$

Следовательно, при малых колебаниях

$$Q_1 \approx Q_2.$$

Заметим, что сила упругости не зависит от выбора x . Поэтому колебания точек B_1 и B_2 будут подчиняться одному закону движения, который приближенно можно описать дифференциальным уравнением [91–95]. В общем случае для точек штанги

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + cy = 0,$$

где m – масса штанги;
 c – жесткость системы.

Данное уравнение можно записать в виде

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + k^2 y = 0, \quad (2.1)$$

где k – круговая частота, $k^2 = \frac{c}{m}$.

Решение уравнения (2.1) имеет вид

$$y = C_1 \sin kt + C_2 \cos kt, \quad (2.2)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования;
 t – время.

Если принять, что $C_1 = A \cos \varphi_0$, $C_2 = A \sin \varphi_0$, то решение уравнения (2.1) будет следующим:

$$y = A \sin(kt + \varphi_0), \quad (2.3)$$

где A – амплитуда колебаний;

φ_0 – начальная фаза колебаний.

В рассматриваемом движении скорость

$$v = \dot{y} = Ak \cos(kt + \varphi_0). \quad (2.4)$$

Значения A и φ_0 определяются из начальных условий. Если предположить, что при $t = 0$, $y = y_0$, $v = v_0$, то при подстановке их в (2.3) и (2.4) получим:

$$y_0 = A \sin \varphi_0, \quad (2.5)$$

$$\frac{v_0}{k} = A \cos \varphi_0. \quad (2.6)$$

Прделав несложные преобразования в (2.5) и (2.6), получим выражения для определения амплитуды и фазы колебаний:

$$A = \sqrt{y_0^2 + \frac{v_0^2}{k^2}}, \quad (2.7)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{ky_0}{v_0}. \quad (2.8)$$

Исключив из (2.3) и (2.4) время t , получим на фазовой плоскости уравнение эллипса, которое показывает финитный характер движения (рис. 2.2).

$$\left(\frac{y}{A}\right)^2 + \left(\frac{v}{k\varphi_0}\right)^2 = 1. \quad (2.9)$$

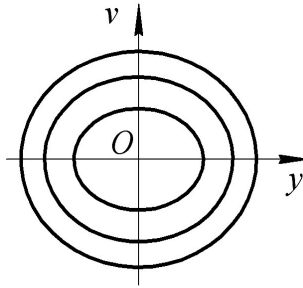


Рис. 2.2. Схема движения точек штанги на фазовой плоскости

Таким образом, колебательный процесс (амплитуда и фаза) задается начальными условиями: начальным отклонением от положения равновесия и начальной скоростью. Свободные колебания в штанге могут возникнуть, например, при переезде границы неровной поверхности поля с ровной уплотненной поверхностью. В этом случае колебания штанги носят устойчивый характер и исключают при подобном движении возможность ее поломки.

2.1.2. Модель колебаний штанги при использовании демпфирующих элементов

Если конструкция штанги имеет демпфирующие устройства, тогда при отсутствии возмущающих факторов колебания точек штанги можно описать линейным уравнением [91–94]

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + cy = 0,$$

где b – параметр демпфирования;

или

$$\ddot{y} + 2n\dot{y} + k^2 y = 0, \quad (2.10)$$

$$\text{где } 2n = \frac{b}{m}. \quad (2.11)$$

Корни характеристического уравнения, полученного из (2.10), равны

$$\delta_{1,2} = -n \pm \sqrt{n^2 - k^2}, \quad (2.12)$$

согласно которым и рассмотрим возможные решения.

Первый случай (малое сопротивление):

$$n < k; \quad k_1 = \sqrt{k^2 - n^2}; \quad \delta_{1,2} = -n \pm ik_1, \quad (2.13)$$

где k_1 – круговая частота затухающих колебаний.

Решение имеет вид:

$$y(t) = Ae^{-nt} \sin(k_1 t + \varphi); \quad (2.14)$$

$$A = \sqrt{y^2 + \frac{(v_0 + ny_0)^2}{k_1^2}}; \quad (2.15)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{k_1 y_0}{v_0 + ny_0},$$

где Ae^{-nt} – условная амплитуда затухающих колебаний;
 φ – фазовый угол.

$$T_1 = \frac{2\pi}{k_1}, \quad T = \frac{2\pi}{k}, \quad T_1 > T,$$

где T, T_1 – соответственно, периоды свободных и затухающих колебаний (рис. 2.3).

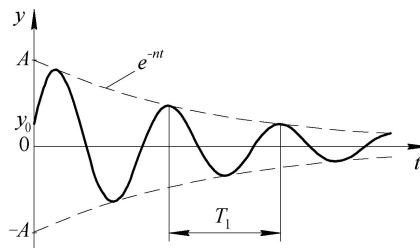


Рис. 2.3. График процесса затухания колебаний штанги

Анализ (2.14) показывает, что движение носит затухающий колебательный характер. Инфинитное движение точки на фазовой плоскости показано на рис. 2.4.

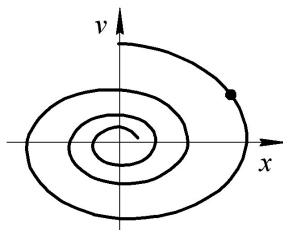


Рис. 2.4. График затухающего движения на фазовой плоскости
 Второй случай (большое сопротивление):

$$n > k; \quad k_2 = \sqrt{n^2 - k^2}; \quad \delta_{1,2} = -n \pm k_2, \quad (2.16)$$

где k_2 – круговая частота затухающих колебаний.

Тогда решение уравнения (2.10) будет иметь вид

$$y(t) = e^{-nt} (C_3 e^{tk_2} + C_4 e^{-tk_2}), \quad (2.17)$$

где C_3, C_4 – постоянные интегрирования.

Значит, материальная точка совершает затухающее неколебательное движение (рис. 2.5).

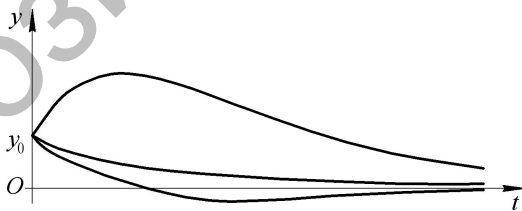


Рис. 2.5. Графики затухающего неколебательного движения

Третий случай (граничный):

$$n = k; \quad \delta_{1,2} = -n. \quad (2.18)$$

Решение имеет вид

$$y(t) = e^{-nt} (C_5 t + C_6), \quad (2.19)$$

где C_5, C_6 – постоянные интегрирования.

Материальная точка также совершает затухающее неколебательное движение. Поведение кривых y в зависимости от времени t в решениях (2.17) и (2.19) зависит от начальных условий [91–94].

Анализ приведенных исследований показывает эффективность демпфирующего элемента в гашении колебаний и необходимость его использования в конструкциях опрыскивателей. Напряжения, возникающие в штанге, будут носить релаксационный характер, соответствующий упруговязкой модели Максвелла.

2.1.3. Модель вынужденных колебаний штанги без использования демпфирующих элементов

В полевых условиях, по причине неровности поверхности поля, в зависимости от силы ветра и от других возмущающих факторов, штанга подвергается внешнему воздействию. В этом случае уравнение колебаний при отсутствии демпфирующего устройства может иметь вид [91–94]

$$m \ddot{y} + cy = Q \sin pt,$$

или

$$\ddot{y} + k^2 y = P_0 \sin pt, \quad (2.20)$$

где $P_0 = \frac{Q}{m}$;

p – частота возмущающей силы.

Решением уравнения (2.20) будет равенство, представленное в виде:

$$y = y_1 + y_2,$$

где y_1 – общее решение уравнения без правой части;

y_2 – частное решение уравнения.

Согласно (2.3), имеем

$$y_1 = A \sin(kt + \varphi_0). \quad (2.21)$$

Будем искать решение y_2 в виде

$$y_2 = a \sin pt, \quad (2.22)$$

где a – постоянная величина, которую надо подобрать так, чтобы равенство обратилось в тождество.

Подставляя y_2 и его вторую производную в уравнение (2.20), имеем

$$-p^2 a \sin pt + k^2 a \sin pt = P_0 \sin pt. \quad (2.23)$$

Это равенство будет выполняться при любом t , если $a(k^2 - p^2) = P_0$, или

$$a = \frac{P_0}{k^2 - p^2}. \quad (2.24)$$

Таким образом, искомое частное решение

$$y_2 = \frac{P_0}{k^2 - p^2} \sin pt. \quad (2.25)$$

Так как $y = y_1 + y_2$, то общее решение окончательно имеет вид

$$y = A \sin(kt + \varphi_0) + \frac{P_0}{k^2 - p^2} \sin pt. \quad (2.26)$$

Решение показывает, что колебания точки штанги складываются в этом случае: из колебаний с амплитудой A (зависящей от начальных условий) и частотой k и колебаний с амплитудой a (не зависящей от начальных условий) и частотой p вынужденных колебаний.

Как видим, амплитуда колебаний зависит от частоты возмущающей силы и частоты собственных колебаний.

Подбирая различные p и k , можно получить вынужденные колебания точек штанги с разными амплитудами. Если величина p близка к k , то амплитуда колебаний становится очень большой. При $p \gg k$, амплитуда колебаний становится очень малой (практически близкой к нулю).

Наиболее опасным для колебаний штанги является случай, когда частота возмущающей силы равна частоте собственных колебаний: $p = k$ – явление резонанса. Амплитуды вынужденных колебаний при резонансе будут со временем неограниченно возрастать (рис. 2.6), что может привести к существенной поломке несущей конструкции штанги.

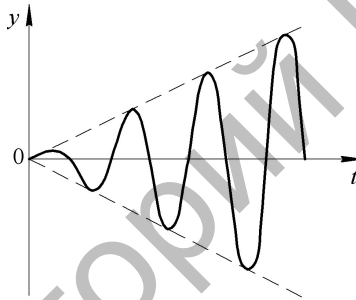


Рис. 2.6. График роста амплитуды при резонансе

2.1.4. Модель вынужденных колебаний штанги с учетом использования демпфирующих элементов

Рассмотрим колебания штанги с учетом возникающих возмущений (неровность поверхности поля, сила ветра, резкое изменение рабочей скорости агрегата и другие возмущающие факторы), а также с учетом наличия демпфирующих устройств [91–94].

В качестве суммарной возмущающей силы можно выбрать силу, зависящую от времени, в виде

$$Q(t) = Q_0 e^{ipt}, \quad (2.27)$$

где i – мнимая единица.

Тогда дифференциальное уравнение колебаний примет вид

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + cy = Q_0 e^{ipt}. \quad (2.28)$$

Задав решение уравнения в виде $y(t) = y_0 e^{ipt}$ и подставив его в дифференциальное уравнение, получим алгебраическое уравнение для определения амплитуды вынужденных колебаний:

$$-mp^2 y_0 + ipby_0 + cy_0 = Q_0, \quad (2.29)$$

или

$$-p^2 y_0 + ip2ny_0 + k^2 y_0 = \frac{Q_0}{m}. \quad (2.30)$$

Откуда амплитуда вынужденных колебаний

$$A = y_0 = \frac{Q_0}{m(k^2 - p^2 + ip2ny_0)}. \quad (2.31)$$

Штанга колеблется с амплитудой A и частотой возмущающей силы p . Анализ зависимости модуля амплитуды от частоты возмущающей силы показывает существенное влияние параметра сопротивления n на рост амплитуды: чем он выше, тем меньше амплитуда (рис. 2.7) [91–95].

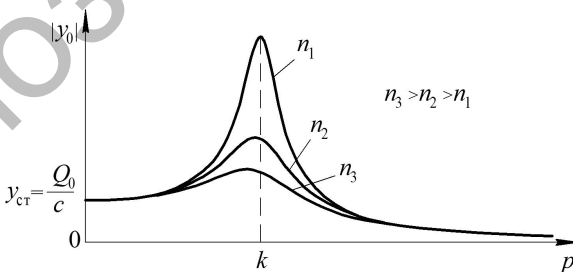


Рис. 2.7. Графические зависимости амплитуды колебаний от частоты возмущающей силы p

При этом модуль амплитуды вынужденных колебаний в зависимости от сопротивления возрастает от $y_{ст} = Q_0 / m$ (при $p = 0$) до некоторой величины, а затем убывает до нуля (при $p \rightarrow \infty$). Значение демпфирующих свойств играет существенную роль в процессе гашения колебаний.

2.2. Уравнения гиперболического типа для описания колебаний штанги

Применим для общего описания колебательного движения штанги волновые уравнения гиперболического типа, которые приведем к уравнению нелинейных колебаний, удобных для исследования деформированного и стохастического движения штанги.

Пусть штанга деформируется в плоскости xOy . Рассмотрим произвольный участок штанги и составим условие равенства нулю суммы проекций на ось Oy действующих сил растяжения.

Сумму проекций на ось Oy растяжения $Q_1 = Q_2 = T_0$, действующих в двух произвольных точках A_1 и A_2 , запишем в виде [103, 104]

$$Y = T_0 [\sin \alpha(x_2) - \sin \alpha(x_1)].$$

Вследствие предположений о малости колебаний, имеем

$$\sin \alpha(x) = \frac{\operatorname{tg} \alpha(x)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha(x)}} = \frac{u_x}{\sqrt{1 + u_x^2}} \approx \frac{\partial u}{\partial x}$$

и, следовательно:

$$Y = T_0 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=x_2} - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=x_1} \right].$$

Так как

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=x_2} - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=x_1} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx,$$

то получим

$$Y = T_0 \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx. \quad (2.32)$$

Обозначим через $p(x, t)$ внешнюю силу, действующую на заданный участок штанги параллельно оси Ou и рассчитанную на единицу длины. Тогда проекция на ось Ou внешней силы, действующей на участок A_1, A_2 , будет равна

$$\int_{x_1}^{x_2} p(x, t) dx. \quad (2.33)$$

Пусть $\rho(x)$ – линейная плотность материала штанги, тогда проекция силы инерции участка A_1, A_2 будет равна

$$-\int_{x_1}^{x_2} \rho(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dx. \quad (2.34)$$

Сумма проекций сил (2.32)–(2.34) на ось Ou , действующих на участок A_1, A_2 , согласно принципу Даламбера должна быть равна нулю, то есть

$$\int_{x_1}^{x_2} \left[T_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \rho(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + p(x, t) \right] dx = 0.$$

Отсюда, ввиду произвольности точек x_1 и x_2 , следует, что подинтегральная функция должна равняться нулю для каждой точки в любой момент времени t , то есть получим уравнение для описания колебаний штанги с учетом возмущающей силы:

$$\rho(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = T_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + p(x, t). \quad (2.35)$$

Таким образом, колебательный процесс штанги можно описать уравнением типа (2.35).

2.3. Определение сдвига точек штанги в случае свободных колебаний

2.3.1. Модель штанги неограниченной длины

Пусть в (2.35) $p(x, t) = 0$, внешнее воздействие отсутствует. Тогда уравнение колебаний однородной штанги имеет вид [103] волнового уравнения:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (2.36)$$

где $a = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$ – скорость волны.

Введем переменные:

$$\xi = x - at, \quad \eta = x + at.$$

Уравнение (2.36) в новых переменных запишется в виде

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \eta} = 0,$$

или

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} \right) = 0.$$

Примем

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} = \omega(\xi),$$

где $\omega(\xi)$ – произвольная функция ξ . Найдем, что

$$u = \int \omega(\xi) d\xi + \Theta_2(\eta),$$

где $\Theta_2(\eta)$ – произвольная функция η . Полагая, что

$$\int \omega(\xi) d\xi = \Theta_1(\xi),$$

получим

$$u = \Theta_1(\xi) + \Theta_2(\eta).$$

Возвращаясь к первоначальным переменным (x, t) , будем иметь

$$u(x, t) = \Theta_1(x - at) + \Theta_2(x + at). \quad (2.37)$$

Функция $u(x, t)$, определяемая формулой (2.37), есть решение уравнения (2.36). Определим физический смысл решения формулы (2.37).

Рассмотрим случай колебания, когда $\Theta_2 \equiv 0$, то есть когда смещение точек штанги при колебательном процессе определяется формулой

$$u_1 = \Theta_1(x - at). \quad (2.38)$$

Положим, что при $t = 0$ абсцисса меняется по закону $x = c + at$, или $x - at = c$.

Функция $u_1 = \Theta_1(x - at)$ описывает распространение прямой волны со скоростью a . Точно так же решение $u_2 = \Theta_2(x + at)$ представляет обратную волну, которая распространяется в отрицательном направлении оси x со скоростью a .

Таким образом, решение (2.37) является суммой прямой и обратной волн вдоль оси штанги.

Отмечаем, что функции $u_1 = \Theta_1(x)$, $u_2 = \Theta_2(x)$ изображают прямую и обратную волны в начальный момент времени.

Рассмотрим верхнюю полуплоскость xOt , в которой ось Ox соответствует положению штанги в начальный момент времени $t = 0$. Всякая точка (x, t) полуплоскости характеризует определенную точку x в определенный момент времени t . Нетрудно при этом найти графически те точки штанги, начальные возмущения которых дошли в момент времени t_0 до точки x_0 . Это будут, согласно вышеизложенному, точки с абсциссами $x_0 \pm at_0$, так как a – скорость распространения колебаний. Для нахождения их на оси x достаточно провести через точку (x_0, t_0) две характеристики:

$$x - at = x_0 - at_0, \quad x + at = x_0 + at_0, \quad (2.39)$$

и в пересечении их с осью Ox получим искомые точки (рис. 2.8).

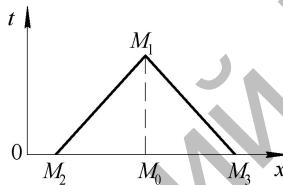


Рис. 2.8. Характеристики возмущений точек штанги на плоскости xOt

Вдоль первой характеристики $\Theta_1(x - at)$ в формуле (2.39) сохраняет постоянное значение, то есть эта прямая дает те значения (x, t) , при которых прямая волна дает то же отклонение, что и при значениях (x_0, t_0) . Вторая характеристика из формулы (2.39) играет ту же роль для обратной волны $\Theta_2(x + at)$. Таким образом, возмущения распространяются по характеристикам.

Найдем решение уравнения (2.36), удовлетворяющее начальным условиям:

$$u|_{t=0} = \varphi_0(x), \quad \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=0} = \varphi_1(x). \quad (2.40)$$

В решении формулы (2.37) и уравнения (2.36) нужно выбрать функции $\Theta_1(x, t)$ и $\Theta_2(x, t)$ так, чтобы удовлетворить начальным условиям (2.40).

Согласно равенствам (2.40) и (2.36), имеем

$$\varphi_0(x, t) = \Theta_1(x, t) + \Theta_2(x, t), \quad \varphi_1(x, t) = -a[\Theta_1'(x, t) - \Theta_2'(x, t)],$$

откуда, интегрируя второе равенство, получим:

$$\Theta_1(x) + \Theta_2(x) = \varphi_0(x), \quad \Theta_1(x) - \Theta_2(x) = -\frac{1}{a} \int_0^x \varphi_1(z) dz + C, \quad (2.41)$$

где C – произвольная постоянная ($z = at$).

Из равенств (2.41) находим:

$$\begin{aligned} \Theta_1(x) &= \frac{1}{2} \varphi_0(x) - \frac{1}{2a} \int_0^x \varphi_1(z) dz + \frac{C}{2}, \\ \Theta_2(x) &= \frac{1}{2} \varphi_0(x) + \frac{1}{2a} \int_0^x \varphi_1(z) dz - \frac{C}{2}. \end{aligned} \quad (2.42)$$

Подставив равенства (2.42) в формулу (2.37), получим

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \frac{\varphi_0(x - at)}{2} - \frac{1}{2a} \int_0^{x-at} \varphi_1(z) dz + \frac{C}{2} + \\ &+ \frac{\varphi_0(x + at)}{2} + \frac{1}{2a} \int_0^{x+at} \varphi_1(z) dz - \frac{C}{2}, \end{aligned}$$

или окончательно:

$$u(x, t) = \frac{\varphi_0(x - at) + \varphi_0(x + at)}{2} + \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{x+at} \varphi_1(z) dz. \quad (2.43)$$

Рассмотрим случай, когда начальные скорости точек равны нулю, а начальное смещение имеет место лишь в конечном промежутке $(-\alpha, \alpha)$, то есть $\varphi_0(x) = 0$ вне этого промежутка.

Решение уравнения (2.43) выражается при этом формулой

$$u(x, t) = \frac{\varphi_0(x - at) + \varphi_0(x + at)}{2}. \quad (2.44)$$

Решение уравнения (2.44) является суммой двух волн, распространяющихся направо и налево со скоростью a , причем начальная форма обеих волн определяется функцией $\frac{1}{2}\varphi_0(x)$, равной половине начального смещения. Пусть точка x штанги лежит правее промежутка $(-\alpha, \alpha)$, то есть $x > \alpha$. При $t < \frac{x - \alpha}{a}$ из вида функции $\varphi_0(x)$ и формулы (2.44) следует, что $u(x, t) = 0$, то есть до точки x волна еще не дошла. С момента времени $t = \frac{x - \alpha}{a}$ точка x начнет колебаться (момент прохождения переднего фронта прямой волны). При $t > \frac{x + \alpha}{a}$ из формулы (2.41) следует, что $u(x, t) = 0$. Моменту времени $t = \frac{x + \alpha}{a}$ соответствует прохождение заднего фронта прямой волны через точку x , после чего в этой точке $u(x, t)$ обращается в нуль. Аналогичные рассуждения можно провести для точек, лежащих внутри промежутка $(-\alpha, \alpha)$ или левее его. Таким образом, в каждой точке штанги после прохождения обеих волн (а для точек, лежащих вне области начального смещения, – после прохождения только одной) наступает покой, то есть сохраняется устойчивое положение точек штанги.

Теперь пусть начальное смещение равно нулю, а $\varphi_1(x)$ отлична от нуля лишь в конечном промежутке $(-\alpha, \alpha)$. В таком случае штанга имеет только начальный импульс. Решение (2.40) принимает следующий вид [103]:

$$u(x, t) = \frac{1}{2a} \int_{x-at}^{x+at} \varphi_1(z) dz, \quad (2.45)$$

или, полагая

$$\frac{1}{2a} \int_0^x \varphi_1(z) dz = \psi(x),$$

получим

$$u(x, t) = \psi(x + at) - \psi(x - at),$$

то есть по штанге распространяются две волны: одна прямая и одна обратная. Исследуем решение (2.45) более подробно. Пусть точка x лежит правее $(-\alpha, \alpha)$.

При $t = 0$ промежуток интегрирования $(x - at), (x + at)$ вырождается в точку x , а затем при увеличении t он расширяется в обе стороны со скоростью a . При $t < \frac{x - \alpha}{a}$ он не будет иметь общих точек с $(-\alpha, \alpha)$, функция $\varphi_1(z)$ в нем равна нулю, и формула (2.45) даст $u(x, t) = 0$, то есть покой в точке x . Начиная с момента времени $t = \frac{x - \alpha}{a}$, промежуток $(x - at, x + at)$ будет налегать на $(-\alpha, \alpha)$, в котором $\varphi_1(z)$ отлична от нуля, и точка x начинает колебаться (момент прохождения переднего фронта волны через точку x). Наконец, при $t > \frac{x + \alpha}{a}$ промежуток $(x - at, x + at)$ будет содержать целиком промежуток $(-\alpha, \alpha)$. Интегрирование по $(x - at, x + at)$ будет сводиться к интегрированию по $(-\alpha, \alpha)$, так как вне его $\varphi_1(z) = 0$, то есть при $t > \frac{x + \alpha}{a}$ имеем постоянное значение $u(x, t)$:

$$u = \frac{1}{2a} \int_{-\alpha}^{\alpha} \varphi_1(z) dz. \quad (2.46)$$

Момент $t = \frac{x - \alpha}{a}$ есть момент прохождения заднего фронта волны через точку x .

Таким образом, действие начального импульса приводит к тому, что с течением времени точки штанги сдвигаются на отрезок, длина которого выражается интегралом (2.46).

2.3.2. Модель штанги ограниченной длины

При использовании для стабилизации штанги и копирования рельефа местности дополнительных опорных колес на крайних секциях штанги (см. рис. 1.31), рассмотрим случай штанги ограниченной длины l . Задача о колебании такой штанги сводится к нахождению решения волнового уравнения [105]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (2.47)$$

при граничных условиях

$$u|_{x=0} = 0; \quad u|_{x=l} = 0, \quad (2.48)$$

при начальных условиях

$$u|_{t=0} = \varphi_0(x), \quad \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{t=0} = \varphi_1(x) (0 \leq x \leq l). \quad (2.49)$$

Запишем решение для данного случая:

$$u(x, t) = \Theta_1(x - at) + \Theta_2(x + at). \quad (2.50)$$

Определим Θ_1 и Θ_2 по формулам:

$$\begin{aligned} \Theta_1(x) &= \frac{1}{2} \varphi_0(x) - \frac{1}{2a} \int_0^x \varphi_1(z) dz, \\ \Theta_2(x) &= \frac{1}{2} \varphi_0(x) + \frac{1}{2a} \int_0^x \varphi_1(z) dz. \end{aligned} \quad (2.51)$$

Отметим, что функции $\varphi_1(x)$ и $\varphi_2(x)$, следовательно, $\Theta_1(x)$ и $\Theta_2(x)$ определены лишь в промежутке $(0, l)$, аргументы $x \pm at$ в формуле (2.50) могут лежать и вне этого промежутка. Для применения решения (2.50) необходимо функции $\varphi_0(x)$ и $\varphi_1(x)$ рассматривать вне промежутка $(0, l)$.

Подставляя в правую часть (2.50) $x = 0$ и $x = l$ и принимая во внимание граничные условия (2.48), получим:

$$\begin{aligned}\Theta_1(-at) + \Theta_2(at) &= 0, \\ \Theta_1(l-at) + \Theta_2(l+at) &= 0,\end{aligned}$$

или, обозначив at через x :

$$\Theta_1(-x) = -\Theta_2(x), \quad \Theta_2(l+x) = -\Theta_1(l-x). \quad (2.52)$$

Когда x изменяется в промежутке $(0, l)$, то первая из формул (2.52) определяет функцию $\Theta_1(x)$ в промежутке $(-l, 0)$, вторая – функцию $\Theta_2(x)$ в промежутке $(l, 2l)$. Следовательно, обе функции $\Theta_1(x)$ и $\Theta_2(x)$ вполне определяются на промежутке длины $2l$. Далее из равенства (2.52) следует, что

$$\Theta_2(2l+x) = -\Theta_2(-x) = \Theta_2(x), \quad \Theta_1(2l+x) = \Theta_1(x),$$

то есть функции $\Theta_1(x)$ и $\Theta_2(x)$ являются функциями периодическими с периодом $2l$. Итак, функции $\Theta_1(x)$ и $\Theta_2(x)$ определены при всех вещественных x .

Эти формулы показывают, что функции $\varphi_0(x)$ и $\varphi_1(x)$ продолжаются из промежутка $(0, l)$ в промежутки $(-l, 0)$ нечетным образом, а затем – с периодом $2l$.

Чтобы полученное решение имело непрерывные производные до второго порядка включительно, помимо условий дифференцируемости функций $\varphi_0(x)$ и $\varphi_1(x)$, необходимым является также выполнение согласования начальных и граничных условий:

$$\varphi_0(0) = \varphi_0(l) = 0, \quad \varphi_0'(0) = \varphi_0'(l), \quad \varphi_1(0) = \varphi_1(l) = 0.$$

Выясним, какое действие оказывают закрепленные концы штанги на ее колебания, для чего обратимся к полуплоскости xOt . Ввиду ограниченности штанги следует рассматривать только полосу верхней полуплоскости $t > 0$, заключающуюся между прямыми $x = 0$ и $x = 1$ (рис. 2.9).

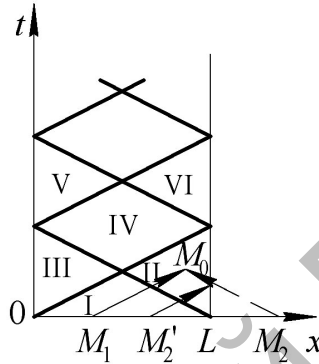


Рис. 2.9. Характеристики волн на поверхности штанги в случае закрепления ее концов

Проведем через точки O и L характеристики до встречи с противоположными границами полосы. Таким образом, разобьем полосу на области (I), (II), (III) и т. д.

Точки области (I) соответствуют тем моментам времени t , когда к точкам x доходят прямая и обратная волны, вышедшие в начальный момент времени из внутренних точек штанги.

Точки вне области (I) соответствуют тем моментам времени t , когда к точкам x доходят волны, вышедшие в начальный момент времени. Возьмем, например, точку $M_0(x_0, t_0)$ в области (II). Так как

$$u(x_0, t_0) = \Theta_1(x_0 - at_0) + \Theta_2(x_0 + at_0),$$

то в этой точке имеются две волны: одна – прямая, дошедшая от начально возмущенной точки M_1 штанги с абсциссой $x = x_0 - at$, другая – обратная из точки M_2 с абсциссой $x = x_0 + at$, причем в данном случае M_1 есть реальная точка, M_2 – фиктивная. Нетрудно заменить ее реальной точкой, заметив, что, в силу (2.52):

$$\Theta_2(x_0 + at_0) + \Theta_2(l + x_0 - l) = -\Theta_1(2l - x_0 - at_0),$$

поэтому обратная волна $-\Theta_1(2l - x_0 - at_0)$, вышедшая в начальный момент времени из точки $M'_2(2l - x_0 - at_0)$, симметричной с M_2 относительно точки L , которая, дойдя до конца L в момент

$$t = \frac{l - (2l - x_0 - at_0)}{a} = \frac{x_0 + at_0 - l}{a},$$

изменила свое направление и знак на обратный и к моменту времени t_0 дошла в таком виде до точки M_0 .

Таким образом, действие закрепленного конца $x = l$ свелось к отражению волны смещения, связанному с переменной знака смещения и с сохранением его абсолютной величины.

То же явление мы обнаруживаем и для волн, дошедших до конца $x = 0$; в точках области (III) будем иметь две волны: обратную и прямую, отраженную от конца $x = 0$. В точках областей (IV), (V), (VI) получим волны, которые претерпели несколько таких отражений от обоих концов штанги.

Из предыдущих рассуждений следует, что колебание штанги, закрепленной на концах, будет периодическим с периодом $\frac{2l}{a}$.

2.4. Модель продольных колебаний штанги

Построим модель продольных колебаний штанги, используя метод получения волнового уравнения, описывающего колебания стержня.

Под действием нагрузок, связанных с неровностью поля, в штанге возникнут продольные колебания. Направим ось Ox вдоль оси штанги и будем считать, что в состоянии покоя концы находятся в точках $x = 0$ и $x = l$. Пусть x – абсцисса некоторого сечения штанги, когда она находится в покое. Пусть $u(x, t)$ смещение этого сечения в момент времени t . Тогда смещение сечения с абсциссой $x + dx$ будет равно (рис. 2.10):

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} dx,$$

где относительное удлинение точек штанги в сечении с абсциссой x выражается производной

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} dx.$$

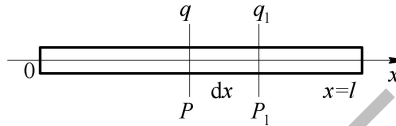


Рис. 2.10. Схема к обоснованию продольных колебаний штанги

Под действием сил

$$T = ES \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (2.53)$$

где E – модуль упругости материала;

S – площадь поперечного сечения штанги.

На элемент dx штанги со стороны сечения Pq и со стороны сечения P_1q_1 действуют силы T_x и T_{x+dx} , приложенные в этих сечениях и направленные вдоль оси Ox . Результирующая этих сил имеет величину [80]

$$T_{x+dx} - T_x = ES \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x+dx} - ES \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_x \approx ES \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx \quad (2.54)$$

и направлена также вдоль оси Ox . Учитывая динамику, можем записать равенство:

$$\rho S dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = ES \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx, \quad (2.55)$$

где ρ – объемная плотность материала.

Обозначив через

$$a = \sqrt{\frac{E}{\alpha^3}} \quad (2.56)$$

и сократив на $S dx$, получим дифференциальное уравнение продольных колебаний:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (2.57)$$

Продольные колебания носят волновой характер, при этом скорость a распространения продольных волн определяется формулой (2.56).

Если действует внешняя сила $F(x, t)$, то вместо (2.55) получим

$$pS dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = ES \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx + F(x, t)S dx,$$

откуда

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + F(x, t). \quad (2.58)$$

Это и есть уравнение вынужденных колебаний штанги. Если учитывать вязкие свойства материала, то уравнение (2.58) можно записать в виде

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \alpha \frac{\partial u}{\partial t} + F(x, t), \quad (2.59)$$

где α – параметр вязкости.

Для решения формул (2.55), (2.58), (2.59) нужны начальные и граничные условия. Начальные условия примем такие:

$$u|_{t=0} = f(x), \quad \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=0} = F(x), \quad (2.60)$$

где $f(x)$ и $F(x)$ – заданные функции в интервале $(0, l)$.

Граничные условия на концах штанги, когда один конец закреплен, другой – свободен:

$$u(0, t) = 0, \quad \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{x=0} = 0 \quad (2.61)$$

в любой момент времени t . Для $x = l$ натяжение $T = ES \frac{\partial u}{\partial x}$ равно нулю (нет внешних сил) и, следовательно, $\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=l} = 0$.

Определим скорость колебания произвольного сечения. Для решения поставленной задачи надо найти решение уравнения (2.57), удовлетворяющее граничным условиям (2.61) и начальным условиям (2.60). Определим функции $f(x)$ и $F(x)$, входящие в начальные условия (5.29), считая, что в начальный момент времени смещение сечения с абсциссой x пропорционально этой абсциссе. Предположим:

$$u|_{t=0} = f(x) = rx, \quad (0 < x < l), \quad (2.62)$$

где r – множитель пропорциональности, который определяется из равенства

$$l_1 - l = rl,$$

или

$$r = \frac{l_1 - l}{l},$$

где $l_1 - l$ – смещение на конце штанги в начальный момент времени.

Скорости смещений сечений равны нулю при $t = 0$, то есть $F(x) = 0$.

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=l} = 0 \quad (0 < x < l).$$

Таким образом, начальные условия имеют вид (2.62). Общее решение уравнения (2.57) будем искать в виде

$$u = \varphi(at - x) + \psi(at + x).$$

Определим функции φ и ψ так, чтобы они удовлетворяли граничным условиям (2.61) и начальным условиям (2.62). Из первого граничного условия (2.61) следует, что

$$u|_{t=0} = \varphi(at) + \psi(at) = 0,$$

или

$$\psi(z) = -\varphi(z), \quad (z = at),$$

вследствие чего формула (2.62) примет вид

$$u = \varphi(at - x) - \varphi(at + x). \quad (2.63)$$

Дифференцируя равенство по x и полагая $x = l$ в силу второго из граничных условий (2.61), получим

$$0 = -\varphi'(at - l) - \varphi'(at + l),$$

или, обозначая переменный аргумент $at + l$ через z , получим равенство

$$\varphi'(z) = -\varphi'(z - 2l), \quad (2.64)$$

с помощью которого можно найти выражение функции $\varphi'(z)$ для всех значений z .

Следовательно, в силу начальных условий (2.62), имеем:

$$rx = \varphi(-x) - \varphi(x), \quad (0 < x < l), \quad (2.65)$$

$$0 = \varphi'(-x) - \varphi'(x). \quad (2.66)$$

Дифференцируя равенство (2.65) по x и решая полученное уравнение совместно с уравнением (2.66), найдем следующее выражение для функции $\varphi'(z)$:

$$\varphi'(z) = -\frac{r}{2}, \quad (2.67)$$

справедливое для всех значений z , лежащих в интервале

$$-l < z < l. \quad (2.68)$$

Тогда из формулы (2.64) следует, что

$$\varphi'(z) = \frac{r}{2} \quad (2.69)$$

для всех значений z , удовлетворяющих неравенству

$$l < z < 3l. \quad (2.70)$$

Заметим, что в силу равенства (2.64) функция $\varphi'(z)$ имеет период $4l$, и тогда из формул (2.67)–(2.70) ясно, что функция $\varphi'(z)$ определяется при всех значениях z .

Теперь рассмотрим распространение волн в возмущенной штанге. Обозначим через v скорость поперечного сечения с абсциссой x : эта скорость определяется с учетом формулы (2.63), из которой можно записать:

$$\frac{v}{a} = \varphi'(at - x) - \varphi'(at + x), \quad \left(v = \frac{\partial u}{\partial t} \right). \quad (2.71)$$

Определим, какие волны подходят в определенные моменты времени к сечению P с абсциссой x . Так как абсцисса лежит внутри

интервала $(0, l)$, то, начиная с момента $t=0$ до момента времени $t = \frac{l-x}{a}$, оба аргумента функций, входящих в правую часть формулы (2.61), не будут выходить за пределы интервала $(-l, l)$. Отсюда, в силу (2.58) и (2.71), следует, что

$$\frac{v}{a} = -\frac{r}{2} + \frac{r}{2} = 0,$$

то есть в течение времени $t = \frac{l-x}{a}$, считая от момента начала колебаний, сечение P остается в покое. Сечение начинает колебаться с момента $t = \frac{l+x}{a}$, то есть когда к нему подойдет обратная волна, вышедшая в начальный момент времени из возмущенного конца $x = l$.

Определим скорость сечения P . Когда время изменяется от момента $t = \frac{l-x}{a}$ до момента $t = \frac{l+x}{a}$, аргумент функции $\varphi'(at-x)$ изменяется в интервале $(-l, l)$, аргумент функции – в интервале $(l, 3l)$. Применив формулы (2.67)–(2.71), получим, что в течение времени

$$t = \frac{l+x}{a} - \frac{l-x}{a} = \frac{2x}{a}$$

сечение P будет обладать скоростью, определяемой равенством:

$$\frac{v}{a} = -\frac{r}{2} - \frac{r}{2} = -r.$$

Исследуем колебания штанги с момента времени $t = \frac{l+x}{a}$. К этому моменту к сечению P подойдет прямая волна, которая произошла от обратной волны, отразившей в момент $t = \frac{l}{a}$ от закрепленного конца $x = 0$.

Отметим, что с момента времени $t = \frac{l+x}{a}$ до момента времени $t = \frac{3l-x}{a}$ сечение P будет находиться в состоянии покоя.

Действительно, в течение указанного времени оба аргумента функций, входящих в формулу (2.71), лежат внутри интервала $(l, 3l)$; вследствие этого из формулы (2.69) вытекает, что

$$\frac{v}{a} = \frac{r}{2} - \frac{r}{2} = 0.$$

В момент времени $t = \frac{3l-x}{a}$ к сечению P снова подойдет обратная волна, которая получилась от прямой волны, после того как последняя отразилась от свободного конца $x=l$ в момент $t = \frac{2l}{a}$. Эта волна будет оказывать свое действие на сечение P до

момента времени $t = \frac{3l+x}{a}$. Действительно, когда t изменяется в пределах от $\frac{3l-x}{a}$ до $\frac{3l+x}{a}$, аргумент функции не выходит из интервала $(l, 3l)$, аргумент функции $\varphi'(at+x)$ – из интервала $(3l, 5l)$, вследствие чего

$$\frac{v}{a} = \frac{r}{2} + \frac{r}{2} = r.$$

Иследуем промежуток времени от $t = \frac{3l+x}{a}$ до $t = \frac{5l-x}{a}$. В течение этого времени сечение P снова придет в состояние покоя. Действительно, в момент времени $t = \frac{3l+x}{a}$ к этому сечению подойдет прямая волна, образовавшаяся из обратной волны, после того как последняя отразилась от закрепленного

конца в момент времени $t = \frac{3l}{a}$. Действие этой волны на сечение P скажется следующим образом. Так как при t , изменяющемся в промежутке $\left(\frac{3l+x}{a}, \frac{5l-x}{a}\right)$, обе функции, находящиеся в правой части равенства (5.40), имеют свои аргументы в интервале $(3l, 5l)$, то

$$\frac{v}{a} = -\frac{r}{2} + \frac{r}{2} = 0,$$

откуда ясно, что в течение времени $t = \frac{2(l-x)}{a}$ сечение P будет находиться в состоянии покоя.

Так как функция $\varphi'(z)$ имеет период $4l$, то далее процесс распространения волн будет повторяться.

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПОДВЕСОК ШТАНГ И СИСТЕМ ИХ СТАБИЛИЗАЦИИ И ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА НАКЛОНА

3.1. Конструкции подвесок штанг и систем их стабилизации и изменения угла наклона

Недостатком большинства конструкций подвесок и систем стабилизации штанги сельскохозяйственного опрыскивателя является то, что соединенные между собой секции штанги имеют общий центр тяжести, смещенный от продольной оси опрыскивателя в плоскости секций, что приводит: 1) к повышенным динамическим нагрузкам на элементы штанги, в особенности – на шарниры крепления штанги к несущей раме, во время движения опрыскивателя по неровностям; 2) возникновению вертикальных колебаний повышенной амплитуды, приводящих к существенному увеличению неравномерности распределения рабочего раствора. При этом передача динамических нагрузок, возникающих при движении опрыскивателя по неровностям поля, происходит именно на связанную посредством блока пружин рамку. Возникающие колебания рамки и, соответственно, штанги, гасятся очень медленно из-за отсутствия гасящих колебания приспособлений. Более того, при наличии постоянных неровностей блок пружин, связывающий рамку и шасси опрыскивателя, выступает не в качестве сглаживающего динамические нагрузки устройства, а в качестве усилителя вертикальных колебаний за счет своих пружинящих свойств и инерции рамки и связанной с ней штанги. Вертикальные колебания, возникающие при этом, по причине отсутствия системы гашения горизонтальных колебаний распределительной штанги, приводят к возникновению повышенной неравномерности внесения рабочего раствора и повышенным динамическим нагрузкам на элементы конструкции опрыскивателя, что снижает его надежность.

Были разработаны конструкции опрыскивателей (рис. 3.1–3.4), позволяющие повысить равномерность распределения рабочего раствора по обрабатываемой поверхности поля за счет уменьшения вертикальных и горизонтальных колебаний штанги от динамических нагрузок, обеспечить постоянство расстояния между распылителями и обрабатываемой поверхностью по ширине штанги и надежность несущей конструкции.

Устройство 1 [106]

Штанга опрыскивателя 5 (рис. 3.1) опирается на ребро треугольной призмы 2, установленной в центральной части верхней балки подвижной рамки 3, выполненной в форме прямоугольника. Подвижная рамка установлена с возможностью вертикального перемещения в направляющих портала 1 рамы опрыскивателя.

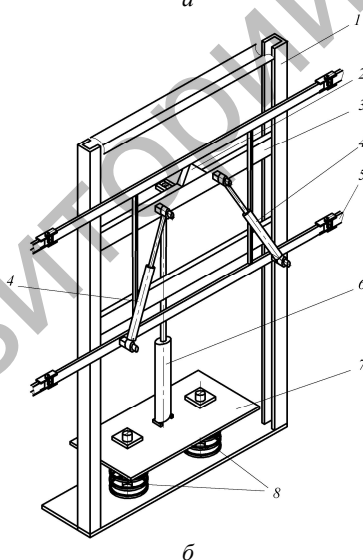
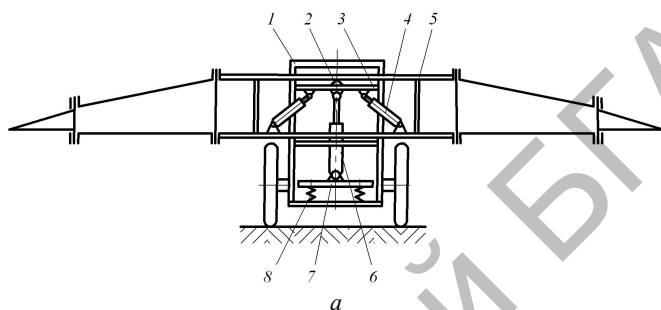


Рис. 3.1. Схема установки штанги на раме полевого штангового опрыскивателя: а – схема опрыскивателя; б – схема подвески штанги и система ее стабилизации

Верхняя балка подвижной рамки закреплена на штоке гидроцилиндра 6 изменения высоты установки штанги, нижний конец которого закреплен на расположенной внутри портала 1 с зазорами горизонтальной пластине 7. Нижняя поверхность горизонтальной пластины 7 опирается на две расположенные своими осями параллельно вертикальной оси симметрии портала 1 винтовые цилиндрические пружины сжатия 8. Нижние торцы пружин 8 опираются на нижнюю внутреннюю горизонтальную поверхность портала 1.

Опрыскиватель работает следующим образом.

При одновременном наезде опорных колес опрыскивателя на препятствие возникает возмущающая сила, которая выводит штангу 5 опрыскивателя из положения равновесия и приводит к ее вертикальным колебаниям. Подвижная рамка 3 имеет одну степень свободы и может совершать движения только в вертикальной плоскости, двигаясь в направляющих пазах несущего портала 1. Пружины 8, установленные между опорной пластиной 7 и порталом 1, сглаживают возмущающую силу, передающуюся от портала к горизонтальной пластине 7, гидроцилиндру 6, подвижной рамке 3 и штанге 5. Амортизаторы 4 гасят возникающие в вертикальной плоскости колебания. Упругие колебания пружин в конструкции могут быть погашены установкой дополнительного амортизатора (амортизаторов) между нижней поверхностью горизонтальной пластины 7 и верхней внутренней горизонтальной плоскостью портала 1. Кроме того, упругие колебания пружин могут быть погашены установкой фрикционных элементов на боковые поверхности подвижной рамки и направляющие портала.

Таким образом, за счет системы гашения вертикальных колебаний, состоящей из опорной горизонтальной пластины 5, двух цилиндрических вертикальных пружин 8, амортизаторов 4 и фрикционных элементов в зазорах между направляющими портала 1 и подвижной рамкой 3, сглаживается возмущающая сила, снижаются амплитуда вертикальных колебаний штанги и динамические нагрузки на конструкцию штанги опрыскивателя, повышается равномерность распределения рабочего раствора по обрабатываемой поверхности, и увеличивается надежность конструкции штанги опрыскивателя.

Устройство 2 [107]

Опрыскиватель (рис. 3.2) состоит из несущего портала 1 рамы, в вертикальных направляющих которого с возможностью перемещения установлена рамка 2, выполненная в виде прямоугольника с вертикальными боковыми сторонами, к которой присоединен верхний конец вертикального гидроцилиндра 9 регулировки положения многосекционной штанги 6 относительно портала по высоте.

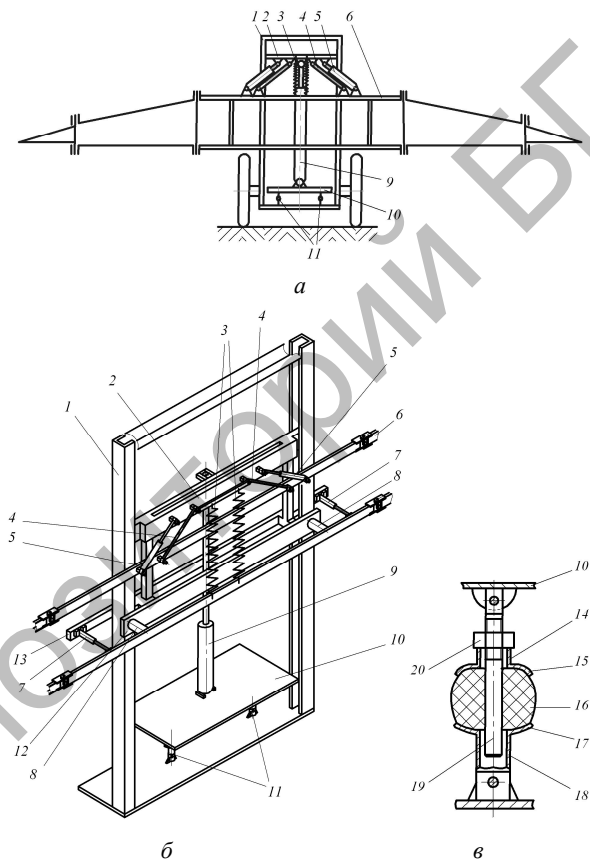


Рис. 3.2. Схема установки штанги на раме полевого штангового опрыскивателя:

а – схема опрыскивателя; б – схема подвески штанги и система ее стабилизации; в – схема динамического гасителя колебаний

Нижний конец гидроцилиндра 9 закреплен на расположенной внутри портала 1 с зазорами горизонтальной пластине 10, нижняя поверхность которой связана с нижней внутренней горизонтальной поверхностью портала 1 с помощью двух присоединенных вертикально расположенных нажимных штанг с упругими элементами 11. Конструкция каждой нажимной штанги состоит из присоединенной к нижней поверхности горизонтальной пластины 10 полый вертикальной трубы 18 с жестко присоединенной к ней вогнутостью вверх нижней опорной чашки 17 с совпадающим с полостью трубы 18 центральным по оси симметрии отверстием. Симметрично горизонтальной плоскости, под нижней опорной чашкой 17, расположена вогнутостью вниз верхняя нажимная чашка 15 с центральным по оси симметрии отверстием, совпадающим с полостью жестко присоединенной к ней и направленной вертикально вверх трубы 14. Между чашками 15 и 17 установлен упругий элемент 16 в виде резинового амортизатора бочкообразной формы с выполненным по его оси симметрии осевым отверстием. В трубу 18 нижней опорной чашки 17, амортизатор 16 и трубу 14 верхней нажимной чашки 15 вставлена нажимная штанга, выполненная в виде стержня 19 с резьбой на верней части, причем в трубы 18 и 14 стержень 19 вставлен с зазором, а сопряжение амортизатора 16 с расположенной в нем нажимной штангой в виде стержня 19 выполнено по переходной посадке. На верхний конец стержня 19 навинчена нажимная гайка 20, которая своим торцом упирается в верхний торец трубы 14 верхней нажимной чашки 15. Перед началом работы опрыскивателя вращением гаек 20 выбирается зазор между ними и верхним торцом трубы 14. На внутренних поверхностях направляющих портала 1 и наружных поверхностях боковых балок рамки 2 установлены фрикционные накладки, предназначенные для гашения упругих колебаний динамического гасителя колебаний.

При недостаточной величине силы трения между фрикционными накладками для более эффективного гашения колебаний рамки в вертикальной плоскости между упорной пластиной 10 и нижней внутренней поверхностью портала 1 дополнительно устанавливается по осевой линии гидравлический или пневматический амортизатор.

Штанга 6 присоединена к рамке 2 с помощью двух расположенных симметрично продольной плоскости симметрии опрыскивателя наклонных маятников 4, двух амортизаторов 5 и пружин 3. В горизонтальной плоскости штанга 6 присоединена к рамке 2

с помощью закрепленных на ней по разные стороны портала 1 упорных балок 12 и 13. К противоположной штанге 6 относительно портала балке 13 присоединены два горизонтальных амортизатора 7. В расположенную с ней на одной стороне портала 1 балку 12 штанга 6 опирается с помощью упругих резиновых упоров 8.

Опрыскиватель работает следующим образом.

При движении опрыскивателя по полю возникают динамические нагрузки на конструкцию опрыскивателя от неровностей рельефа поля. Рамка 2 имеет возможность двигаться только в плоскости несущего портала 1 в направляющих. Подвеска распределительной штанги 6 на рамке 2 позволяет ей раскачиваться только в плоскости рамки 2. Регулировка высоты подъема распределительной штанги 6 выполняется при помощи гидроцилиндра 9, который расположен на упорной пластине 10 и связан с рамкой 2 и нижней частью портала 1. Воздействие динамической нагрузки приводит к возникновению раскачивания распределительной штанги 6 и вертикальным колебаниям рамки 2 и распределительной штанги 6. Амортизаторы 5, соединенные одним концом с распределительной штангой 6, другим – с рамкой 2, во время раскачивания распределительной штанги 6 способствуют резкому снижению амплитуды колебаний и времени полного затухания раскачивания. Распределительная штанга 6, рамка 2 и гидроцилиндр 9 опираются всем весом на опорную пластину 10. Резиновые амортизаторы 11, установленные между опорной пластиной 11 и несущим порталом 1 рамы опрыскивателя, гасят $\frac{2}{3}$ динамической нагрузки, передающейся от рамы опрыскивателя и портала 1 на опорную пластину 10, предотвращая возникновение вертикальных колебаний рамки 2 и распределительной штанги 6. При этом динамическая нагрузка на элементы конструкции штанги опрыскивателя уменьшается за счет сил трения между фрикционными накладками, установленными на внешних боковых поверхностях портала и внутренних поверхностях направляющих, резиновых амортизаторов 11, а также за счет сил трения стержней нажимных штанг 19 о внутреннюю цилиндрическую поверхность отверстий амортизаторов 11 при их деформации. При горизонтальных колебаниях распределительной штанги 6, возникающих от воздействия возмущающей силы, упругости конструкции и наличия зазоров, она опирается в резиновые упоры 8 и амортизаторы 7, что позволяет быстро погасить горизонтальные колебания и снять динамические нагрузки с конструкции штанги опрыскивателя.

Устройство 3 [108]

Опрыскиватель (рис. 3.3) состоит из несущего портала 1 рамы, в вертикальных направляющих которого с возможностью перемещения установлена рамка 2, выполненная в виде прямоугольника с вертикальными боковыми сторонами, к которой присоединен верхний конец вертикального гидроцилиндра 7 регулировки положения многосекционной штанги 3 относительно портала по высоте.

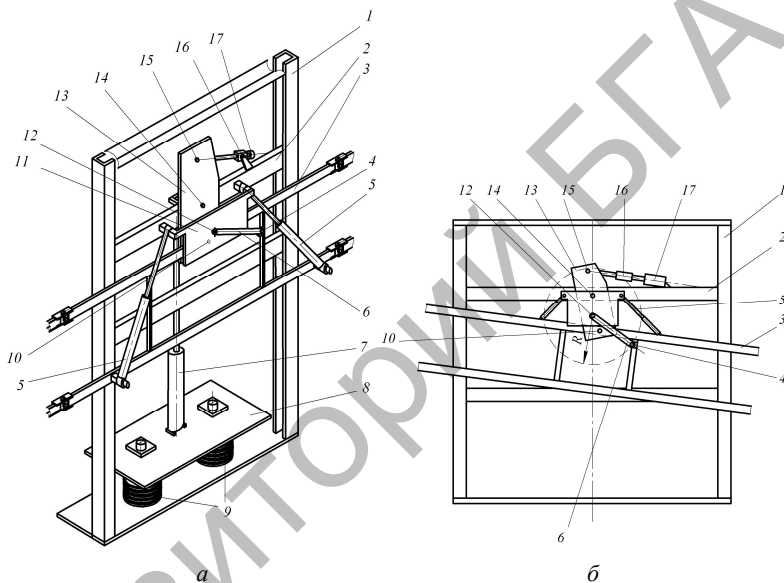


Рис. 3.3. Схема подвески штанги с системой ее стабилизации (а) и механизмом изменения угла наклона (б)

Нижний конец гидроцилиндра 7 закреплен на расположенной внутри портала 1 с зазорами относительно его вертикальных направляющих горизонтальной пластине 8, нижняя поверхность которой опирается на две расположенные своими осями симметрично вертикальной оси симметрии портала 1 кольцевые цилиндрические винтовые пружины 9, нижние торцы которых опираются на нижнюю внутреннюю горизонтальную поверхность портала 1. На рамке 2, на расположенной в вертикальной продольной плоскости симметрии опрыскивателя горизонтальной оси 14, шарнирно

крепится, с возможностью поворота, выполненный в виде пластины поворотный кронштейн 13, плоскости которого расположены вертикально и перпендикулярны продольной вертикальной плоскости симметрии опрыскивателя. В нижней части поворотного кронштейна 13, на расположенной в вертикальной продольной плоскости симметрии опрыскивателя горизонтальной оси 10, крепится, с возможностью вращательного движения, многосекционная штанга 3 с форсунками и гибкими рукавами.

На рамке 2 закреплена упорная пластина 11, плоскости которой параллельны плоскостям поворотного кронштейна 13, причем последний расположен между рамкой 2 и упорной пластиной 11, содержащей ось 4, на которой крепится шарнирно, с возможностью поворота, поворотная тяга 6, соединенная своим нижним концом шарнирно, с возможностью поворота посредством оси 4, многосекционной штангой 3. По вертикальным бокам поворотного кронштейна 13 рамка 2 и многосекционная штанга 3 соединены гидравлическими амортизаторами 5 для снижения вертикальных колебаний. Механизм изменения положения штанги 3 включает в себя закрепленный на рамке 2 электромотор 17, редуктор 16 с винтовой парой типа «винт-гайка», поворотный кронштейн 13 и тягу 6 с возможностью изменения угла положения распределительной штанги за счет совместного поступательного и вращательного движения поворотного кронштейна 13 и многосекционной штанги. Винт редуктора 16 соединен с поворотным кронштейном 13 с помощью расположенного в его верхней части шарнира 15, с возможностью их относительного поворота.

При недостаточной величине силы трения между фрикционными накладками для более эффективного гашения колебаний рамки в вертикальной плоскости в конструкции между упорной пластиной 8 и нижней внутренней поверхностью портала 1 дополнительно устанавливается по осевой линии гидравлический или пневматический амортизатор.

Опрыскиватель работает следующим образом.

При необходимости изменения положения распределительной штанги приводится в действие электромотор 17, который через редуктор 16 приводит в движение поворотный кронштейн 13, поворачивающийся на оси 10 относительно рамки 2. Поворотный кронштейн 13 смещает многосекционную штангу 3, прикрепленную

к нему через ось 10. При смещении многосекционной штанги 3 поворотная тяга 6 и ось 4, соединяющая поворотную тягу 6 и многосекционную штангу 3, совершают вращательное движение радиусом R относительно центра, проходящего через ось 13. Изменение угла положения многосекционной штанги 3 относительно горизонта обеспечивается ее совместным поступательным движением от воздействия поворотного кронштейна 13 и вращательным движением по дуге радиусом R с центром на оси 12. Таким образом, механизм изменения положения штанги относительно горизонта позволяет повысить производительность опрыскивателя, снизить трудоемкость процесса изменения угла положения штанги относительно горизонта и время, затрачиваемое на рабочий процесс внесения пестицидов за счет отсутствия необходимости регулировки угла положения многосекционной штанги вручную механизатором, особенно в условиях постоянного изменения рельефа почвы, снятия необходимости остановок для операции изменения угла положения распределительной штанги.

При одновременном наезде опорных колес опрыскивателя на препятствие возникает возмущающая сила, которая выводит штангу 3 опрыскивателя из положения равновесия и приводит к ее вертикальным колебаниям. Рамка 2 имеет одну степень свободы и может совершать движения только в вертикальной плоскости, двигаясь в направляющих пазах несущего портала 1. При этом расположенные на наружных поверхностях боковых сторон рамки и на внутренних поверхностях портала – фрикционные накладки в значительной степени демпфируют и гасят колебания рамки 2 и штанги 3, подвешенной шарнирно на рамке 2. Пружины 9, установленные между опорной пластиной 8 и порталом 1 и обладающие повышенными демпфирующими свойствами, сглаживают возмущающую силу, передающуюся от несущей рамы к упорной пластине 8, гидроцилиндру 7, рамке 2 и штанге 3. Амортизаторы 5 сглаживают колебания, возникающие от воздействия пружин 9, и позволяют быстро привести конструкцию штанги опрыскивателя в положение равновесия и покоя.

Таким образом, за счет системы гашения вертикальных колебаний, состоящей из опорной пластины 8, пружин 9, амортизаторов 5 и фрикционных накладок, установленных на внешних поверхностях боковых сторон рамки и внутренних поверхностях портала,

сглаживается возмущающая сила, снижается амплитуда вертикальных колебаний штанги и динамические нагрузки на конструкцию штанги опрыскивателя, повышается равномерность распределения рабочего раствора по обрабатываемой поверхности и увеличивается надежность конструкции штанги опрыскивателя.

Данные системы могут быть установлены на опрыскивателях с параллелограммной подвеской штанги (рис. 3.4).

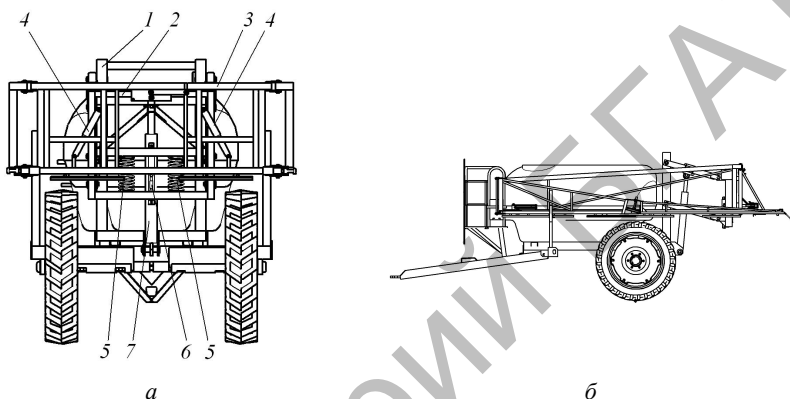


Рис. 3.4. Схема подвески штанги опрыскивателя и системы ее стабилизации (а) при параллелограммном способе навешивания (б)

При параллелограммном способе навешивания штанги подвижная рамка 2 установлена с возможностью вертикального движения в боковых направляющих портала 1 рамы и нижней горизонтальной поверхностью опирается на цилиндрические вертикальные пружины 5 и амортизатор 6. Нижние края амортизатора 6 и пружин 5 установлены на верхней поверхности нижней балки портала 1. Штанга 3 подвешена по принципу маятника в верхней части подвижной рамки 2. Высота установки штанги изменяется гидроцилиндром 7. Для гашения вертикальных колебаний штанги в системе стабилизации дополнительно установлены амортизаторы 4.

Опрыскиватель работает следующим образом.

Перед началом работы устанавливается необходимая норма внесения рабочей жидкости, при помощи гидравлической системы трактора раскладывается штанга 3, при помощи гидроцилиндра 7 устанавливается требуемая ее высота над обрабатываемой поверхностью. Включается

привод насоса, и начинается разгон агрегата до необходимой рабочей скорости. При копировании опорными колесами микронеровностей поля возникают возмущения, передаваемые раме опрыскивателя, а через гидроцилиндр 7 и параллелограммный механизм – и порталу 1. Так как штанга 3 опрыскивателя подвешена на подвижной рамке 2, изолированной от портала 1 двумя пружинами 5, то большая часть возмущений гасится за счет сил упругости, которые сглаживаются демпфирующей силой амортизатора 6 и силами трения между поверхностями подвижной рамки 2 и портала 1. Остальные возмущения гасятся амортизаторами 4. При этом конструкцией подвески, пружинами 5 и амортизаторами 4 и 6 обеспечивается эффективная стабилизация штанги опрыскивателя в вертикальной плоскости.

При этом следует отметить, что при различных условиях (степень заполнения емкости рабочей жидкостью, высота и шаг микронеровностей поверхностей и т. д.) движения агрегата параметры колебаний рамы, подвески и несущей конструкции штанги будут также различными. Для эффективной работы системы стабилизации необходимым условием является выбор оптимальных характеристик упругих и демпфирующих элементов и параметров их установки. Этим и объясняется важность исследований, позволяющих на стадии проектирования смоделировать движение штанги и работу системы ее стабилизации.

3.2. Теоретические исследования жестко закрепленной штанги на раме опрыскивателя

3.2.1. Колебания штанги без учета изгиба ее несущей конструкции

Исполнение несущей конструкции штанги и способ ее крепления к раме опрыскивателя определяют не только качество опрыскивания, но и надежность конструкции, и технологические режимы ее работы. Как отмечалось ранее, жесткое крепление штанги или ее составных частей к несущей раме опрыскивателя налагает ограничение на рабочие скорости движения агрегата

и ширину захвата, следовательно, и на его производительность. Этот тип крепления оправдан только при ширине захвата 9...15 м и рабочих скоростях до 6...7 км·ч⁻¹ [36, 38, 109–111]. Однако в конструкциях современных опрыскивателей используются распределительные штанги, ширина которых больше 15 м, при этом рабочие скорости достигают 12 км·ч⁻¹.

Примем, что в процессе колебаний несущая конструкция штанги не изгибается. Колебательный процесс штанги полевого опрыскивателя может быть описан уравнением Лагранжа 2-го рода [91–94]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \phi} = Q, \quad (3.1)$$

где t – время;

q – обобщенная координата;

$\dot{\phi}$ – обобщенная скорость;

E_k – кинетическая энергия системы:

$$E_k = \frac{a\dot{\phi}^2}{2},$$

где a – инерционный коэффициент (масса системы);

Q – обобщенная сила.

Если принять за обобщенную координату угол поворота штанги $q = \phi$, тогда уравнение (3.1) примет вид [91–94, 112]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \phi} = - \frac{\partial E_n}{\partial \phi} + Q_\phi^c, \quad (3.2)$$

где E_n – потенциальная энергия системы;

Q_ϕ^c – обобщенная сила сопротивления среды (воздуха).

Примем, что все элементы штанги не изгибаются и отклоняются на одинаковый угол.

Направим вдоль штанги ось x (рис. 3.5), тогда для любого элементарного отрезка длины dx и массы dm потенциальная энергия определяется суммой работы силы тяжести dA_T элемента, отклоненного от равновесного положения $\lambda_{ст}$, и работы силы упругости dA_y , действующей на элемент штанги при его перемещении из состояния с координатой $z + \lambda_{ст}$ в нулевое $\lambda_{ст}$, то есть

$$dE_{п} = dA_T + dA_y .$$

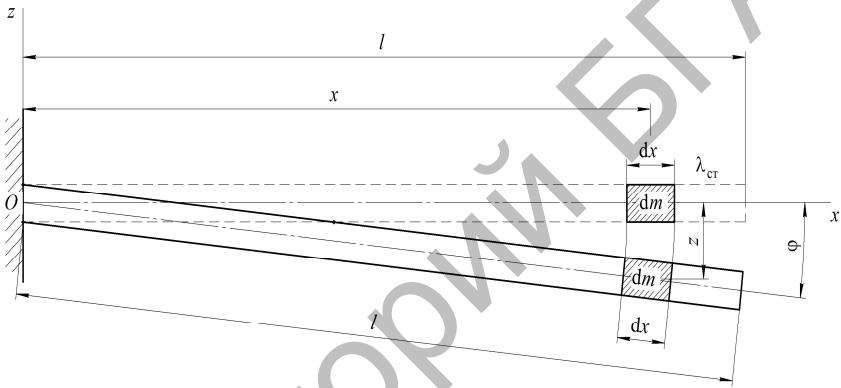


Рис. 3.5. Схема к определению параметров колебаний штанги

При этом

$$dA_T = -zdmg , \quad (3.3)$$

где z – отклонение рассматриваемого элемента штанги от равновесного положения $\lambda_{ст}$.

$$dA_y = \int_{z+\lambda_{ст}}^{\lambda_{ст}} F_y dz . \quad (3.4)$$

С учетом того, что $F_y = -cz$, выражение (3.4) примет вид

$$\begin{aligned}
 dA_y &= -c \int_{z+\lambda_{\text{cr}}}^{\lambda_{\text{cr}}} z dz = -c \frac{z^2}{2} \Big|_{z+\lambda_{\text{cr}}}^{\lambda_{\text{cr}}} = \\
 &= -\frac{c}{2} \left[\lambda_{\text{cr}}^2 - (z + \lambda_{\text{cr}})^2 \right] = c\lambda_{\text{cr}} z + \frac{c}{2} z^2,
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

где c – коэффициент жесткости конструкции.

Таким образом, потенциальная энергия элемента штанги

$$dE_{\text{п}} = -z dm g + c\lambda_{\text{cr}} z + \frac{c}{2} z^2. \tag{3.6}$$

Приняв, что отклонение всех элементов штанги определяется углом поворота φ , получим

$$z = \varphi x,$$

где x – горизонтальная координата элемента штанги.

Выражение (3.6) примет окончательный вид:

$$dE_{\text{п}} = -x\varphi dm g + c\lambda_{\text{cr}} x\varphi + \frac{c}{2} x^2 \varphi^2. \tag{3.7}$$

В положении равновесия обобщенная сила равна нулю:

$$Q^{\text{п}} = -\left(\frac{\partial E_{\text{п}}}{\partial q} \right)_{q=0} = 0,$$

то есть

$$Q_{\varphi=0}^{\text{п}} = -\left(\frac{\partial (dE_{\text{п}})}{\partial \varphi} \right)_{\varphi=0} = -dm g x + c\lambda_{\text{cr}} x + \left(\frac{c}{2} x^2 2\varphi \right)_{\varphi=0} = 0. \tag{3.8}$$

Окончательно:

$$dE_n = \frac{c}{2} x^2 \varphi^2. \quad (3.9)$$

Тогда полная потенциальная энергия (всей штанги длиной l)

$$E_n = \frac{c}{2} \varphi^2 \int_0^l x^2 dx = \frac{c}{6} l^3 \varphi^2. \quad (3.10)$$

Обобщенная сила, соответствующая этой потенциальной энергии E_n :

$$Q_\varphi^n = -\frac{\partial E_n}{\partial \varphi} = -\frac{2c}{6} l^3 \varphi = -c_R \varphi, \quad (3.11)$$

где $c_R = \frac{1}{3} c l^3$.

Определим обобщенную часть силы, вызванную силой сопротивления:

$$Q = \sum_{k=1}^n \bar{F}_k \frac{d\bar{r}_k}{dq}. \quad (3.12)$$

Принимая силу сопротивления элемента штанги, радиуса-вектора $\bar{r}_k - \bar{F}_k = -\mu_k \bar{v}_k$, получаем

$$Q = \sum_{k=1}^n \bar{F}_k^c \frac{d\bar{r}_k}{dq} = -\sum_{k=1}^n \mu_k \bar{v}_k \frac{d\bar{r}_k}{dq}, \quad (3.13)$$

где μ_k – коэффициент сопротивления воздушной среды;

$$\bar{v}_k = \frac{d\bar{r}_k}{dt} = \frac{d\bar{r}_k}{dt} \frac{dq}{dq} = \frac{d\bar{r}_k}{dq} \frac{dq}{dt} = \frac{d\bar{r}_k}{dt} \Phi, \quad (3.14)$$

где $\Phi = \frac{dq}{dt}$.

С учетом (3.14), зависимость (3.13) примет следующий вид:

$$Q^c = -\sum_{k=1}^n \mu_k \left(\frac{d\bar{r}_k}{dq} \right)^2 \varphi = -F(q)\varphi. \quad (3.15)$$

Раскладывая функцию $F(q)$ в ряд Тейлора, имеем

$$F(q) = F(0) + F'(0)q + \dots \quad (3.16)$$

С целью линеаризации уравнения колебаний штанги в зависимости (3.16) ограничимся первым членом $F(0) = \mu_k$. Тогда

$$Q^c = -\mu_k \varphi = -\mu_k \varphi. \quad (3.17)$$

С учетом полученных выражений для кинетической энергии и обобщенной силы из уравнения Лагранжа, получим уравнение колебаний штанги в дифференциальной форме:

$$I_z \ddot{\varphi} + \mu_k \dot{\varphi} + c_R \varphi = 0,$$

где I_z – момент инерции относительно оси z .

Разделив обе части уравнения на I_z , получим

$$\ddot{\varphi} + \frac{\mu_k}{I_z} \dot{\varphi} + \frac{c_R}{I_z} \varphi = 0,$$

или в стандартном виде

$$\ddot{\varphi} + 2b\dot{\varphi} + k^2\varphi = 0, \quad (3.18)$$

где $2b = \frac{\mu_k}{I_z}$ – характеристика величины сопротивления;

$k^2 = \frac{c_R}{I_z}$ – циклическая частота.

Решение данного уравнения ищем в виде $\varphi = e^{nt}$, подставив которое в (3.18), получим характеристическое уравнение:

$$n^2 + 2bn + k^2 = 0.$$

Корнями данного уравнения являются

$$n_{1,2} = -b \pm \sqrt{b^2 - k^2} = -b \pm k_1 i,$$

где $k_1 = \sqrt{k^2 - b^2}$.

То есть корни характеристического уравнения являются комплексными.

Решение полученного уравнения колебаний штанги для малых сопротивлений $b < k$ имеет вид

$$\varphi = e^{-bt} A \sin(k_1 t + \varphi_0), \quad (3.19)$$

где A и φ_0 – постоянные интегрирования, которые определяются по начальным условиям (A – амплитуда колебаний, φ_0 – начальная фаза).

Период затухающих колебаний можно определить по зависимости

$$T = \frac{2\pi}{k_1} = \frac{2\pi}{\sqrt{k^2 - b^2}}. \quad (3.20)$$

Декремент колебаний равен e^{-bT} , а модуль его логарифма (логарифмический декремент) $bT = \frac{2\pi\mu_k}{I_z \sqrt{\frac{cl^3}{3I_z} - \frac{\mu_k^2}{4I_z^2}}}$.

Подставив ранее введенные обозначения в (3.19), окончательно получим

$$\varphi = e^{-\frac{\mu_k}{2I_z} t} A \sin\left(t \sqrt{\frac{cl^3}{3I_z} - \frac{\mu_k^2}{4I_z^2}} + \varphi_0\right). \quad (3.22)$$

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{cl^3}{3I_z} - \frac{\mu_k^2}{4I_z^2}}}. \quad (3.23)$$

Используя уравнение Лагранжа 2-го рода, получили уравнения для определения параметров затухающих колебаний жестко закрепленной штанги без учета ее изгиба. Анализируя (3.22) и (3.23), следует отметить, что эффективность затухания колебаний определяется жесткостью конструкции штанги и ее размерами.

3.2.2. Колебания штанги в вертикальной плоскости с учетом изгиба ее конструкции

Колеблющуюся штангу представим в виде колеблющейся системы с двумя степенями свободы (упругая система в двух точках) (рис. 3.6) [113]. Связи считаем стационарными голономными. Тогда колебания будем описывать уравнениями Лагранжа 2-го рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\phi}_1} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_1} = Q_1, \quad (3.24)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\phi}_2} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_2} = Q_2.$$

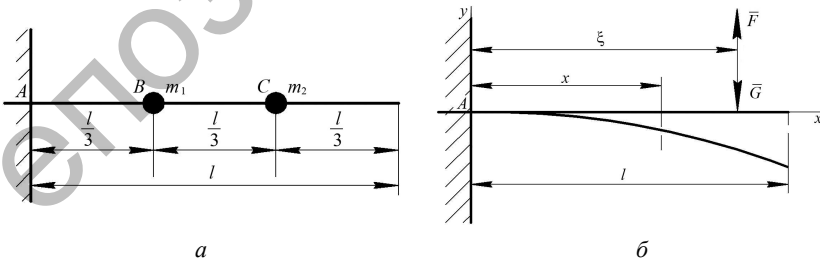


Рис. 3.6. Расчетная схема колебаний штанги с учетом изгиба:
 а – расчетная схема штанги с двумя степенями свободы;
 б – схема изгиба штанги под действием силы

Каждая из обобщенных сил в общем случае состоит из трех сил: обобщенной силы от потенциальных сил Q_i^n , сил сопротивления Q_i^c и возмущающих сил Q_i^b , которые будут иметь кратковременный характер и могут быть учтены начальными условиями. Для рассмотрения линейных колебаний около положения устойчивого равновесия необходимо получить разложения в ряды кинетической, потенциальной энергий и диссипативной функции.

Кинетическая энергия системы

$$E_k = \sum \frac{m_k \bar{v}_k^2}{2} = \sum m_k \frac{\dot{\bar{r}}_k^2}{2}. \quad (3.25)$$

Для системы с двумя степенями свободы, на которую наложены стационарные голономные связи, радиус-вектор каждой точки \bar{r}_k является функцией только обобщения координат q_1 и q_2 , зависящих от времени. Поэтому производная по времени от радиус-вектора

$$\frac{d\bar{r}}{dt} = \frac{\partial \bar{r}_k}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial \bar{r}_k}{\partial q_2} \dot{q}_2. \quad (3.26)$$

Подставляя производную в выражение кинетической энергии для получения линейных дифференциальных уравнений колебаний штанги, ограничиваясь первыми членами a_{11} , a_{12} и a_{22} в разложении в ряд в окрестности равновесия ($q_1 = q_2 = 0$) выражений при \dot{q}_1 и $(\dot{q}_1 \cdot \dot{q}_2)$, получим следующее выражение для кинетической энергии:

$$E_k = \frac{1}{2} (a_{11} \dot{q}_1^2 + 2a_{12} \dot{q}_1 \dot{q}_2 + a_{22} \dot{q}_2^2). \quad (3.27)$$

Это можно записать подробно, с учетом (3.26):

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2} \left(\dot{q}_1^2 \sum m_k \left(\frac{\partial \bar{r}_k}{\partial q_1} \right)^2 + 2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 \sum m_k \frac{\partial \bar{r}_k}{\partial q_1} \cdot \frac{\partial \bar{r}_k}{\partial q_2} + \dot{q}_2^2 \sum m_k \left(\frac{\partial \bar{r}_k}{\partial q_2} \right)^2 \right) = \\ &= \frac{1}{2} (A_{11} \dot{q}_1^2 + 2A_{12} \dot{q}_1 \dot{q}_2 + A_{22} \dot{q}_2^2), \end{aligned}$$

где введены обозначения:

$$A_{11} = \sum m_k \left(\frac{\partial \bar{r}_k}{\partial q_1} \right)^2; A_{12} = \sum m_k \frac{\partial \bar{r}_k}{\partial q_1} \cdot \frac{\partial \bar{r}_k}{\partial q_2}; A_{22} = \sum m_k \left(\frac{\partial \bar{r}_k}{\partial q_2} \right)^2, \quad (3.26a)$$

которые, как и \bar{r}_k , зависят только от q_1 и q_2 .

Разложим каждую из этих функций в выражении (3.26a) в ряд по степеням q_1 и q_2 в окрестности равновесия, где принимаем $q_1 = q_2 = 0$, и получаем для

$$A_{11}(q_1, q_2) = (A_{11})_0 + \left(\frac{\partial A_{11}}{\partial q_1} \right)_0 q_1 + \left(\frac{\partial A_{11}}{\partial q_2} \right)_0 q_2 + \dots$$

Аналогичные разложения получаются для A_{12} и A_{22} .

Обозначим $a_{11} = (A_{11})_0$; $a_{12} = (A_{12})_0$; $a_{22} = (A_{22})_0$, которые называются коэффициентами инерции системы. Отбрасывая члены третьего и более высокого порядка по отношению к q_1, q_2 , ~~и~~ ~~и~~ (для линеаризации соответствующих дифференциальных уравнений), получим (3.27) для кинетической энергии.

Потенциальная энергия системы с двумя степенями свободы для стационарных связей и силового поля зависят только от обобщенных координат q_1 и q_2 . Пренебрегая слагаемыми третьего и более высокого порядка, потенциальную энергию запишем в следующем виде:

$$E_{\text{п}} = \frac{1}{2} (c_{11} q_1^2 + 2c_{12} q_1 q_2 + c_{22} q_2^2), \quad (3.28)$$

где $c_{11} = \left(\frac{\partial^2 E_{\text{п}}}{\partial q_1^2} \right)_0$; $c_{12} = \left(\frac{\partial^2 E_{\text{п}}}{\partial q_1 \partial q_2} \right)_0$; $c_{22} = \left(\frac{\partial^2 E_{\text{п}}}{\partial q_2^2} \right)_0$ – обобщенные коэффициенты жесткости.

Разложим в ряд выражение потенциальной энергии

$$E_n(q_1, q_2) = (E_n)_0 + \left(\frac{\partial E_n}{\partial q_1} \right)_0 q_1 + \left(\frac{\partial E_n}{\partial q_2} \right)_0 q_2 + \left(\frac{\partial^2 E_n}{\partial q_1^2} \right)_0 \frac{q_1^2}{2} + \\ + \left(\frac{\partial^2 E_n}{\partial q_1 \partial q_2} \right)_0 q_1 q_2 + \left(\frac{\partial^2 E_n}{\partial q_2^2} \right)_0 \frac{q_2^2}{2} + \dots$$

Потенциальную энергию в положении равновесия $(E_n)_0$ принимаем равной нулю, величины $\left(\frac{\partial E_n}{\partial q_1} \right)_0 = 0$, $\left(\frac{\partial E_n}{\partial q_2} \right)_0 = 0$ – как значения обобщенных сил в положении равновесия. Тогда получаем (3.79).

Так как в положении устойчивого равновесия потенциальная энергия имеет минимум, то коэффициенты разложения c_{11} , c_{12} , c_{22} , как вторые производные от E_n по переменным q_1 и q_2 , должны удовлетворить условиям:

$$c_{11} > 0 ; c_{22} > 0 ; c_{11}c_{22} - c_{12}^2 > 0 \text{ или } \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{vmatrix} > 0 . \quad (3.28a)$$

С другой стороны, эти условия являются условиями определенной положительности квадратичной формы для E_n .

С учетом формулы для кинетической (3.26) и потенциальной (3.28) энергии, имеем

$$Q_1 = Q_1^{E_n} = -\frac{\partial E_n}{\partial q_1} = -(c_{11}q_1 + c_{12}q_2).$$

$$Q_2 = Q_2^{E_n} = -\frac{\partial E_n}{\partial q_2} = -(c_{12}q_1 + c_{22}q_2).$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial q_1} = a_{11}\dot{q}_1 + a_{12}\dot{q}_2.$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial q_2} = a_{12}\dot{q}_1 + a_{22}\dot{q}_2.$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial q_1} = \frac{\partial E_k}{\partial q_2} = 0, \text{ так как } E_k \text{ от } q_1 \text{ и } q_2 \text{ явно не зависит.}$$

Подставляя эти значения в уравнения Лагранжа (3.24), получаем линейные дифференциальные уравнения собственных колебаний системы с двумя степенями свободы без учета сопротивления:

$$\begin{cases} (a_{11}\ddot{q}_1 + c_{11}q_1) + (a_{12}\ddot{q}_2 + c_{12}q_2), \\ (a_{12}\ddot{q}_1 + c_{12}q_1) + (a_{22}\ddot{q}_2 + c_{22}q_2). \end{cases} \quad (3.29)$$

Решение системы уравнений (3.29) следует искать в виде $q_1 = c_1 e^{\lambda t}$, $q_2 = c_2 e^{\lambda t}$.

Прямой подстановкой в (3.29) нетрудно убедиться, что все значения λ – мнимые и, следовательно, частные решения уравнений (3.29) можно записать в виде

$$q_1 = A_1 \sin(kt + \alpha), \quad q_2 = A_2 \sin(kt + \alpha), \quad (3.30)$$

где A_1 и A_2 – амплитуда колебаний;
 k – собственная частота колебаний;
 α – начальная фаза.

Тогда

$$\ddot{q}_1 = -A_1 k^2 \sin(kt + \alpha); \quad \ddot{q}_2 = -A_2 k^2 \sin(kt + \alpha).$$

Подставляя выражения и формулу (3.30) в систему уравнений (3.29), получим тождества, в которых коэффициенты при $\sin(kt + \alpha)$ должны быть равны нулю.

В результате это дает систему двух однородных линейных уравнений для определения амплитуд A_1 и A_2 :

$$\begin{cases} A_1(c_{11} - a_{11}k^2) + A_2(c_{12} - a_{12}k^2) = 0, \\ A_1(c_{12} - a_{12}k^2) + A_2(c_{22} - a_{22}k^2) = 0. \end{cases} \quad (3.31)$$

Чтобы при решении системы уравнений (3.31) A_1 и A_2 были получены отличными от нуля, определитель этой системы должен быть равен нулю или коэффициенты при A_1 и A_2 в уравнениях (3.31) должны быть пропорциональными.

$$\begin{vmatrix} c_{11} - a_{11}k^2 & c_{12} - a_{12}k^2 \\ c_{12} - a_{12}k^2 & c_{22} - a_{22}k^2 \end{vmatrix} = 0, \quad (3.32)$$

или пропорциональность коэффициентов позволяет записать:

$$-\frac{c_{11} - a_{11}k^2}{c_{12} - a_{12}k^2} = -\frac{c_{12} - a_{12}k^2}{c_{22} - a_{22}k^2} = \frac{A_2}{A_1} = \mu. \quad (3.33)$$

Отсюда, раскрывая определитель, или из пропорциональности коэффициентов получаем уравнения частот:

$$(c_{11} - a_{11}k^2)(c_{22} - a_{22}k^2) - (c_{12} - a_{12}k^2)^2 = 0. \quad (3.34)$$

Корни k_1^2 и k_2^2 (3.85) вещественны и положительны, иначе $k_1 = \sqrt{k_1^2}$ и $k_2 = \sqrt{k_2^2}$ не будут вещественны, и уравнения (3.29) не будут иметь решений вида (3.30), чего для системы, выведенной из положения устойчивого равновесия некоторым возмущением, быть не может.

Для системы с двумя степенями свободы это следует также из требования определенной положительности квадратичных форм для кинетической и потенциальной энергии.

Меньшую из частот обозначим k_1 , большую — k_2 . Они являются частотами собственных колебаний системы и полностью определяются характеристиками системы (коэффициентами инерции и жесткости). Соответствующие этим частотам колебания называются главными. При этом частота k_1 называется основной частотой, а главные колебания, соответствующие этой частоте, — основным колебанием.

Каждой из частот k_1 и k_2 соответствуют определенные значения амплитуд и начальных фаз: $A_1^{(1)}$, $A_2^{(1)}$, α_1 – для частоты k_1 и $A_1^{(2)}$, $A_2^{(2)}$, α_2 – для частоты k_2 . В соответствии с этим получим по два значения обобщенных координат q_1 и q_2 , ($q_1^{(1)}$ и $q_1^{(2)}$, $q_2^{(1)}$ и $q_2^{(2)}$).

Для вертикальных колебаний балки пусть первому главному колебанию соответствуют обобщенные координаты $Z_1^{(1)}$ и $Z_2^{(1)}$, а второму – $Z_1^{(2)}$, $Z_2^{(2)}$. Тогда для этих обобщенных координат Z_1 и Z_2 получим:

$$\begin{aligned} Z_1^{(1)} &= A_1^{(1)} \sin(k_1 t + \alpha_1); \\ Z_2^{(1)} &= A_2^{(1)} \sin(k_1 t + \alpha_1); \\ Z_1^{(2)} &= A_1^{(2)} \sin(k_2 t + \alpha_2); \\ Z_2^{(2)} &= A_2^{(2)} \sin(k_2 t + \alpha_2). \end{aligned} \quad (3.35)$$

Система линейных однородных уравнений (3.31) дает возможность определить только отношение амплитуд. Для первого (k_1) и второго (k_2) главных колебаний, соответственно, получаем:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \frac{A_2^{(1)}}{A_1^{(1)}} = \frac{Z_2^{(1)}}{Z_1^{(1)}}. \\ \mu_2 &= \frac{A_2^{(2)}}{A_1^{(2)}} = \frac{Z_2^{(2)}}{Z_1^{(2)}}. \end{aligned} \quad (3.36)$$

Общее решение уравнения (3.29) с учетом (3.36) для принятых обобщенных координат $q_1 = Z_1$ и $q_2 = Z_2$ выразим в виде суммы частных:

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_1^{(1)} + Z_1^{(2)} = A_1^{(1)} \sin(k_1 t + \alpha_1) + A_1^{(2)} \sin(k_2 t + \alpha_2); \\ Z_2 &= Z_2^{(1)} + Z_2^{(2)} = \mu_1 q_1^{(1)} + \mu_2 q_1^{(2)} = \\ &= \mu_1 A_1^{(1)} \sin(k_1 t + \alpha_1) + \mu_2 A_1^{(2)} \sin(k_2 t + \alpha_2), \end{aligned} \quad (3.37)$$

где постоянные $A_1^{(1)}$, $A_1^{(2)}$, α_1 , α_2 определяются из начальных условий.

Таким образом, собственные линейные колебания системы с двумя степенями свободы состоят из суммы двух главных гармонических колебаний с частотами k_1 и k_2 .

Если за новые обобщенные координаты системы выбрать $Z_1^{(1)}$ и $Z_1^{(2)}$, называемые главными координатами системы, то главное колебание с частотой k_1 будет характеризоваться только обобщенной координатой $Z_1^{(1)}$, а главное колебание с частотой k_2 – координатой $Z_1^{(2)}$. Для главных координат система уравнений распадается на два отдельных независимых уравнения. В данном случае выражения кинетической и потенциальной энергии не должны содержать членов с произведениями переменных. Это требование можно положить в основу поиска главных координат другим методом. Тогда произвольные обобщенные координаты через главные, в соответствии с (3.37), должны выражаться их линейными комбинациями, поэтому результирующее движение не является уже простым гармоническим колебанием.

Рассмотрим влияние линейного сопротивления на собственные колебания системы. В качестве обобщенных координат q_1 и q_2 возьмем главные координаты системы Z_1 и Z_2 . Тогда квадратичные формулы для кинетической и потенциальной энергии содержат только квадраты своих переменных:

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2}(a_{11}Z_1^2 + a_{22}Z_2^2); \\ E_n &= \frac{1}{2}(c_{11}Z_1^2 + c_{22}Z_2^2), \end{aligned} \tag{3.38}$$

то есть $c_{12} = 0$ и $a_{12} = 0$.

В нашем случае из равенств (3.37) следует:

$$E_k = \frac{1}{2}(m_{11}Z_1^2 + m_{22}Z_2^2),$$

то есть $a_{11} = m_1$ и $a_{22} = m_2$ – инерционные коэффициенты.

Для учета сопротивления колебаниям принимаем, что на точки системы действуют линейные силы сопротивления среды, пропорциональные скорости точек v_k , то есть

$$\bar{F}_k = -\beta_k \bar{v}_k = -\beta_k \dot{r}_k,$$

где β_k – постоянные коэффициенты сопротивления.

Тогда обобщенная сила сопротивления Q_1^Φ , согласно определению обобщенной силы и с учетом того, что

$$\frac{\partial \bar{r}_k}{\partial q_1} = \frac{\partial \dot{r}_k}{\partial \dot{q}_1},$$

может быть выражена в виде

$$Q_1^\Phi = \sum \bar{F}_k \frac{\partial \bar{r}_k}{\partial Z_1} = -\sum \beta_k \dot{r}_k \frac{\partial \dot{r}_k}{\partial \dot{Z}_1} = -\frac{\partial}{\partial \dot{Z}_1} \sum \frac{\beta_k \bar{v}_k^2}{2} = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{Z}_1},$$

где $\Phi = \sum \frac{\beta_k \bar{v}_k^2}{2} = \sum \frac{\beta_k \dot{r}_k^2}{2}$ – диссипативная функция, характеризующая скорость убывания полной механической энергии вследствие действия линейных сил сопротивления.

Аналогично:

$$Q_2^\Phi = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{Z}_2}.$$

Диссипативная функция по своей структуре аналогична кинетической энергии. Поэтому, выполнив для Φ разложение в ряд в окрестности положения равновесия и отбросив члены третьего и более высокого порядка, как и для кинетической энергии, получим

$$\Phi = \frac{1}{2} (\beta_{11} Z_1^2 + 2\beta_{12} Z_1 Z_2 + \beta_{22} Z_2^2). \quad (3.39)$$

В диссипативной функции в общем случае сохраняется член с произведением переменных даже в случае использования главных координат.

Подставляя значение E_k , E_n и Φ в уравнения Лагранжа типа (3.80) только для координат Z_1 и Z_2 , получим систему уравнений собственных колебаний с учетом линейного сопротивления:

$$\begin{cases} (a_{11} Z_1 + \beta_{11} \dot{Z}_1 + c_{11} z_1) + \beta_{12} \dot{Z}_2 = 0, \\ \beta_{12} \dot{Z}_1 + (a_{22} Z_2 + \beta_{22} \dot{Z}_2 + c_{22} z_2) = 0. \end{cases} \quad (3.40)$$

Коэффициенты системы уравнений удовлетворяют условиям:

$$\begin{cases} a_{11} > 0, a_{22} > 0, c_{11} > 0, c_{22} > 0, \\ \beta_{11} > 0, \beta_{22} > 0, \\ \begin{vmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \end{vmatrix} = \beta_{11}\beta_{22} - \beta_{12}^2 > 0. \end{cases} \quad (3.41)$$

В этом случае использование главных координат не приводит к распадению системы уравнений на независимые уравнения, но делает ее несколько проще. Решение системы (3.40) представим в виде:

$$\begin{aligned} Z_1 &= C_1 e^{\lambda t}; \\ Z_2 &= C_2 e^{\lambda t}. \end{aligned} \quad (3.42)$$

Представляя равенство (3.42) в систему уравнения (3.40) и сокращая $e^{\lambda t}$, получим:

$$\begin{aligned} C_1 (a_{11} \lambda^2 + \beta_{11} \lambda + c_{11}) + C_2 \beta_{12} \lambda &= 0, \\ C_1 \beta_{12} \lambda + C_2 (a_{22} \lambda^2 + \beta_{22} \lambda + c_{22}) &= 0. \end{aligned} \quad (3.43)$$

Система линейных однородных уравнений (3.43) относительно неизвестных c_1 и c_2 имеет ненулевые решения при условии, что определитель этой системы равен нулю:

$$\begin{vmatrix} a_{11}\lambda^2 + \beta_{11}\lambda + c_{11} & \beta_{12}\lambda \\ \beta_{12}\lambda & a_{22}\lambda^2 + \beta_{22}\lambda + c_{22} \end{vmatrix} = 0.$$

Раскрывая определитель, получаем характеристичные уравнения для λ , являющегося уравнением четвертой степени:

$$\begin{aligned} & a_{11}a_{22}\lambda^4 + (a_{11}\beta_{22} + a_{22}\beta_{11})\lambda^3 + \\ & + (a_{11}c_{22} + a_{22}c_{11} + \beta_{11}\beta_{22} - \beta_{12}^2)\lambda^2 + \\ & + (\beta_{11}c_{22} + \beta_{22}c_{11})\lambda + c_{11}c_{22} = 0. \end{aligned} \quad (3.44)$$

Четырем его корням $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ соответствуют значения постоянных C_1 и C_2 .

Из уравнений (3.43) можем определить не величины C_1 и C_2 для каждого корня λ_i , а только их отношения:

$$\frac{C_2^{(i)}}{C_1^{(i)}} = -\frac{a_{11}\lambda_i^2 + \beta_{11}\lambda_i + c_{11}}{\beta_{12}\lambda_i} = -\frac{\beta_{12}\lambda_i}{a_{22}\lambda_i^2 + \beta_{22}\lambda_i + c_{22}}. \quad (3.45)$$

Индекс $i=1, 2, 3, 4$ указывает, для какого корня λ_i берутся постоянные C_1 и C_2 .

С учетом условия (3.41), возможны следующие варианты корней характеристического уравнения (3.44) и, соответственно, решений системы дифференциальных уравнений (3.40):

1. При малом сопротивлении корни комплексные. Они попарно сопряженные, так как коэффициенты вещественны и имеют отрицательные вещественные части:

$$\lambda_{1,2} = -n_1 \pm k_1 i;$$

$$\lambda_{3,4} = -n_2 \pm k_2 i.$$

После подстановки этих значений λ в (3.42) и некоторых преобразований получаем:

$$\begin{aligned} Z_1 &= e^{-n_1 t} [B_1^{(1)} \cos k_1 t + D_1^{(1)} \sin k_1 t] + e^{-n_2 t} [B_1^{(2)} \cos k_2 t + D_1^{(2)} \sin k_2 t] = \\ &= A_1^{(1)} e^{-n_1 t} \sin(k_1 t + \alpha_1^{(1)}) + A_1^{(2)} e^{-n_2 t} \sin(k_2 t + \alpha_1^{(2)}); \\ Z_2 &= e^{-n_1 t} [B_2^{(1)} \cos k_1 t + D_2^{(1)} \sin k_1 t] + e^{-n_2 t} [B_2^{(2)} \cos k_2 t + D_2^{(2)} \sin k_2 t] = \\ &= A_2^{(1)} e^{-n_1 t} \sin(k_1 t + \alpha_2^{(1)}) + A_2^{(2)} e^{-n_2 t} \sin(k_2 t + \alpha_2^{(2)}). \end{aligned} \quad (3.46)$$

Таким образом, каждая из главных координат является суммой двух затухающих колебаний. При этом четыре из восьми постоянных $A_1^{(1)}$, $A_1^{(2)}$, $A_2^{(1)}$, $A_2^{(2)}$, $\alpha_1^{(1)}$, $\alpha_1^{(2)}$, $\alpha_2^{(1)}$, $\alpha_2^{(2)}$ определяются из начальных условий; другие четыре – через коэффициенты $C_1^{(i)}$, $C_2^{(i)}$.

2. В случае больших сопротивлений корни действительные. Они могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} \lambda_{1,2} &= -n_1 \pm k_1, \\ \lambda_{3,4} &= -n_2 \pm k_2. \end{aligned}$$

Причем

$$\begin{aligned} k_1 &< n_1. \\ k_2 &< n_2. \end{aligned}$$

Тогда выражение для главных координат Z_1 и Z_2 представится в виде:

$$\begin{aligned} Z_1 &= e^{-n_1 t} (C_1^{(1)} e^{k_1 t} + C_1^{(2)} e^{-k_1 t}) + e^{-n_2 t} (C_1^{(3)} e^{k_2 t} + C_1^{(4)} e^{-k_2 t}). \\ Z_2 &= e^{-n_1 t} (C_2^{(1)} e^{k_1 t} + C_2^{(2)} e^{-k_1 t}) + e^{-n_2 t} (C_2^{(3)} e^{k_2 t} + C_2^{(4)} e^{-k_2 t}). \end{aligned} \quad (3.47)$$

В этом случае движение неперiodическое затухающее.

3. Два корня действительные, а два – комплексно-сопряженные:

$$\lambda_{1,2} = -n_1 \pm k_1.$$

$$\lambda_{3,4} = -n_2 \pm k_2 i.$$

Тогда для Z_1 и Z_2 получаем:

$$Z_1 = e^{-n_1 t} (C_1^{(1)} e^{k_1 t} + C_1^{(2)} e^{-k_1 t}) + A_1^{(2)} e^{-n_2 t} \sin(k_2 t + \alpha_1^{(2)}). \quad (3.48)$$

$$Z_2 = e^{-n_1 t} (C_2^{(1)} e^{k_1 t} + C_2^{(2)} e^{-k_1 t}) + A_2^{(2)} e^{-n_2 t} \sin(k_2 t + \alpha_2^{(2)}).$$

В этом случае имеет место наложение затухающих колебаний на затухающее движение. Произвольные обобщенные координаты выражаются линейно через главные. Следовательно, каждая из них является линейной комбинацией рассмотренных трех видов движений.

Для конкретного построения уравнений колебаний рассмотрим задачу об изгибе штанги под действием силы тяжести G и некоторой возмущающей силы F , приложенных на некотором расстоянии ξ от жестко закрепленного конца штанги.

Дифференциальное уравнение изогнутой оси штанги в нашем случае имеет вид

$$EJ \frac{d^2 Z}{dx^2} = M(x), \quad (3.49)$$

где E – модуль упругости штанги;

J – момент инерции поперечного сечения;

$M(x)$ – изгибающий момент сил.

Значение изгибающего момента для сечения на расстоянии x от начала координат будет иметь вид [113]

$$M(x) = (F - G)(\xi - x). \quad (3.50)$$

Тогда уравнение (3.49) примет вид

$$EJ \frac{d^2 Z}{dx^2} = (F - G)(\xi - x). \quad (3.51)$$

Проинтегрировав уравнение (3.102) один раз, находим

$$EJZ' = (F - G) \left(\xi x - \frac{x^2}{2} \right) + C_1. \quad (3.52)$$

Интегрируя вторично, получим

$$EJZ = (F - G) \left(\xi \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right) + C_1 x + C_2. \quad (3.53)$$

Постоянные C_1 и C_2 определяются из граничных условий. При жестком креплении штанги с остовом опрыскивателя имеем:

$$x = 0; Z = 0; \frac{dZ}{dx} = Z' = 0.$$

С учетом этого, из выражений (3.52) и (3.53) получим, что $C_1 = 0$ и $C_2 = 0$.

Тогда из уравнения (3.53) получим уравнение изогнутой оси штанги:

$$Z = \frac{E - G}{EJ} \left(\frac{\xi x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right). \quad (3.54)$$

В дальнейшем будем использовать коэффициенты влияния вместо коэффициентов жесткости, которые требуют знания потенциальных сил. Для коэффициентов влияния можно использовать следующее определение:

$$q_j = \sum \delta_{jk} \bar{F}_k, \quad (j = 1, 2, \dots, s), \quad (3.55)$$

то есть коэффициент влияния δ_{jk} равен j -й обобщенной координате, соответствующей k -й обобщенной силе, равной единице.

В нашем случае коэффициенты влияния равны Z_1 и Z_2 в положении равновесия, когда все обобщенные силы равны нулю, за исключением единичной обобщенной силы, соответствующей нашим обобщенным координатам.

Используем формулу (3.54) для определения прогибов балки единичной вертикальной силой. Силу последовательно прикладываем в точках сосредоточения массы штанги. Масса m_1 – в точке

$$x_1 = \frac{1}{3}l, \text{ масса } m_2 \text{ – в точке } x_2 = \frac{2}{3}l.$$

Согласно (3.54):

$$Z_1 = \frac{Z}{F-G} = \frac{1}{EJ} \left(\frac{\xi x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right). \quad (3.56)$$

Для $\xi_1 = x_1$, согласно (3.56), коэффициент влияния

$$\delta_{11} = |Z_1^{(1)}| = \frac{l^3}{81EJ}. \quad (3.57)$$

При $x_1 = \frac{1}{3}l$, $\xi_2 = \frac{2l}{3}$ коэффициент влияния

$$\delta_{12} = \delta_{21} = |Z_2^{(2)}| = \frac{5l^3}{162EJ}. \quad (3.58)$$

При $x_2 = \xi = \frac{2}{3}l$ коэффициент влияния

$$\delta_{22} = |Z_2^{(2)}| = \frac{8l^3}{81EJ}. \quad (3.59)$$

Принимая во внимание (3.59), уравнения (3.24), с помощью коэффициентов влияния и с учетом, что $q = Z$, можно представить так:

$$\begin{aligned} Z_1 &= -\delta_{11}a_{11}\ddot{Z}_1 - \delta_{12}a_{22}\ddot{Z}_2, \\ Z_2 &= -\delta_{21}a_{11}\ddot{Z}_1 - \delta_{22}a_{22}\ddot{Z}_2. \end{aligned} \quad (3.60)$$

Так как внешними силами являются силы инерции $-a_{jk}\ddot{Z}_k$ и с учетом того, что коэффициент инерции $a_{12} = 0$ и $a_{11} = m_1$; $a_{22} = m_2$, уравнение (3.60) примет вид:

$$\begin{aligned} Z_1 &= -\delta_{11}m_1\ddot{Z}_1 - \delta_{12}m_2\ddot{Z}_2, \\ Z_2 &= -\delta_{21}m_1\ddot{Z}_1 - \delta_{22}m_2\ddot{Z}_2. \end{aligned} \quad (3.61)$$

Если условия (3.28а) выполнены, решение полученных дифференциальных уравнений (3.61) будем искать в соответствии с (3.30) в виде:

$$\begin{aligned} Z_1 &= A_1 \sin(kt + \alpha), \\ Z_2 &= A_2 \sin(kt + \alpha). \end{aligned} \quad (3.62)$$

Тогда отношение

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{A_2}{A_1} = \mu. \quad (3.63)$$

Откуда

$$A_2 = \mu A_1. \quad (3.64)$$

Дважды продифференцировав систему (3.62), с учетом равенства (3.64), получим:

$$\begin{aligned} \ddot{Z}_1 &= -k^2 A_1 \sin(kt + \alpha), \\ \ddot{Z}_2 &= -k^2 \mu A_1 \sin(kt + \alpha). \end{aligned} \quad (3.65)$$

Подставив равенства (3.65) в уравнение (3.61), получим два линейных уравнения для определения частоты и коэффициента распределения:

$$\begin{aligned}
 (\delta_{11} + \mu\delta_{12})mk^2 &= 1. \\
 (\delta_{12} + \mu\delta_{22})mk^2 &= \mu.
 \end{aligned}
 \tag{3.66}$$

Исключив из этих уравнений μ , получим уравнение частот:

$$k^4 - \frac{\delta_{11} + \delta_{22}}{m(\delta_{11}\delta_{22} - \delta_{12}^2)}k^2 + \frac{1}{m_2(\delta_{11}\delta_{22} - \delta_{12}^2)} = 0.
 \tag{3.67}$$

Подставив в (3.67) коэффициенты влияния δ_{ji} , полученные в (3.57)–(3.59), имеем

$$k^4 - 416,47 \frac{EJ}{ml^3} + 199,14 \frac{E^2 J^2}{m^2 l^6} = 0.
 \tag{3.68}$$

Решение биквадратного уравнения (3.68) дает для его корней

$$k^2 = 208,28 \frac{EJ}{ml^3} \pm 199,14 \frac{EJ}{ml^3}.
 \tag{3.69}$$

Откуда:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= 3,02 \sqrt{\frac{EJ}{ml^3}}, \\
 k_2 &= 20,2 \sqrt{\frac{EJ}{ml^3}}.
 \end{aligned}
 \tag{3.70}$$

Таким образом, частоты колебаний штанги определяются упругими свойствами материала сечения и зависят от ее массы, длины и коэффициента инерции.

Используя предыдущие выкладки для значений частот k_1 и k_2 , получим соответствующие коэффициенты распределения, характеризующие формы главных колебаний:

$$\mu_1 = \frac{1 - k_1^2 m \delta_{11}}{k_1^2 m \delta_{12}} = 3,14.$$

$$\mu_2 = \frac{1 - k_2^2 m \delta_{11}}{k_2^2 m \delta_{12}} = -0,32.$$

Влияние линейного сопротивления на колебания штанги определяется соотношениями (3.39)–(3.51).

На рис. 3.7 показаны первые две формы главных колебаний.

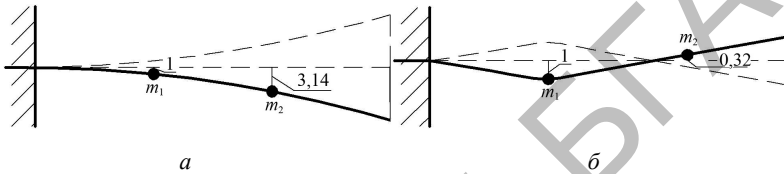


Рис. 3.7. Первая (а) и вторая (б) формы главных колебаний штанги

3.2.3. Колебания штанги в горизонтальной плоскости с учетом изгиба ее конструкции

При колебании штанги в вертикальной плоскости возвращающей силой является сила тяжести, в горизонтальной – ее момент. Для построения уравнений колебаний в горизонтальной плоскости рассмотрим задачу об изгибе штанги под действием силы инерции, приложенной на расстоянии ξ от зашцементированного (не свободного) конца штанги (рис. 3.8) [114].

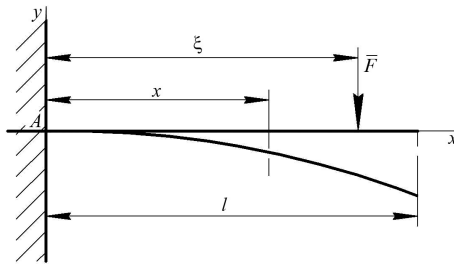


Рис. 3.8. Схема изгиба оси штанги под действием единичной силы

Используя исследования предыдущего раздела, рассмотрим колебания штанги в горизонтальной плоскости xOy .

Дифференциальное уравнение изогнутой оси штанги в нашем случае имеет вид

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = M(x), \quad (3.71)$$

где E – модуль упругости штанги;

J – момент инерции поперечного сечения;

$M(x)$ – изгибающий момент от единичной силы.

Значение изгибающего момента запишем для произвольного сечения на расстоянии x от начала координат. Тогда будем иметь [114]

$$M(x) = -1(\xi - x). \quad (3.72)$$

Дифференциальное уравнение изогнутой оси штанги примет вид

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = -(\xi - x). \quad (3.73)$$

После первого интегрирования данного уравнения будем иметь

$$EJy' = -\left(\xi x - \frac{x^2}{2}\right) + C. \quad (3.74)$$

После второго интегрирования получим

$$EJy = -\left(\frac{\xi x^2}{2} - \frac{x^3}{6}\right) + Cx + D. \quad (3.75)$$

Постоянные C и D определяются из условий защемления штанги, то есть зависят от вида связей штанги с рамой опрыскивателя. В нашем случае (жесткого защемления) можно считать:

$$x = 0; \quad y = 0; \quad \frac{dy}{dx} = y' = 0.$$

Подставив эти значения в выражения (3.74) и (3.75), получим, что $C = 0$ и $D = 0$.

Тогда из уравнения (3.75) при подстановке постоянных получим уравнение изогнутой оси штанги:

$$y = -\frac{1}{EJ} \left(\frac{\xi x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right). \quad (3.76)$$

Данное решение будем использовать в определении коэффициентов влияния, которые равны числовому значению координаты $y_1(y_2)$ в положении равновесия, когда все обобщенные силы равны нулю, кроме силы, соответствующей данной обобщенной координате, при этом сама сила, как было отмечено, равна единице. В нашей задаче вместо коэффициентов жесткости удобнее использовать коэффициенты влияния, которые требуют знания потенциальных сил.

Используя формулу (3.76), находим абсолютные значения прогибов балки от единичной вертикальной силы. Силу будем последовательно прикладывать в точках, где сосредоточены массы штанги. Масса m_1

сосредоточена в точке $x_1 = \frac{l}{3}$, масса m_2 – в точке $x_2 = \frac{2l}{3}$.

Дальнейшие исследования, проведенные в последовательности, изложенной в подразделе 3.2.2, подтвердили, что частоты колебаний штанги в горизонтальной плоскости определяются упругими свойствами материала сечения и зависят от ее массы, длины и коэффициента инерции.

Из анализа полученных математических зависимостей становится очевидным, что на начальные параметры вынужденных колебаний и нагрузки в несущих конструкциях штанг существенное влияние оказывают следующие факторы: величина обобщенной силы и инерционные коэффициенты (массы) секций штанги, определяемые ее конструктивными особенностями.

3.3. Особенности колебательного процесса штанги при использовании различных демпфирующих элементов в системе стабилизации

3.3.1. Использование амортизаторов в системе стабилизации

Разнообразие конструкций и размеров штанг требует обоснованного подхода к разработке систем гашения колебаний, основанного на рациональном использовании характеристик и параметров установки амортизаторов. Рассмотрим эффективность гашения колебаний штанги парой амортизаторов, установленных под углом α_a к горизонтальной плоскости (рис. 3.9). Система состоит из шасси 2 с рамой 1, в направляющих которой в вертикальном направлении перемещается подвижная рамка 3, закрепленная на штоке гидроцилиндра 5 изменения высоты установки штанги 4, которая опирается на подвижную рамку с возможностью свободного перемещения. Гашение колебаний штанги в вертикальной плоскости обеспечивается амортизаторами 6.

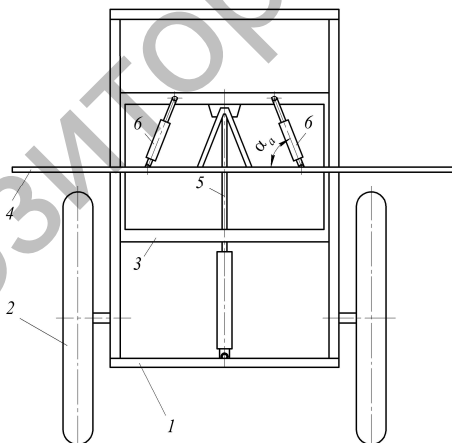


Рис. 3.9. Схема к расчету амортизаторов системы стабилизации штанги:
1 – рама; 2 – шасси опрыскивателя; 3 – подвижная рамка; 4 – штанга;
5 – гидроцилиндр изменения высоты установки штанги;
6 – амортизаторы

Эффективность работы предложенной системы стабилизации определяется коэффициентом сопротивления амортизаторов и углом α_a их установки к горизонтальной плоскости. Рассмотрим процесс колебания системы в вертикальной плоскости и их гашения амортизаторами.

Движение штанги относительно опоры штанги на подвижной рамке может быть описано уравнением Лагранжа 2-го рода [91–96, 115]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \phi} = Q, \quad (3.77)$$

где t – время;

$\dot{\phi}$ – обобщенная скорость (для поступательного движения системы в направляющих $\dot{\phi} = \dot{x} = v = v_c$);

q – обобщенная координата;

E_k – кинетическая энергия системы:

$$E_k = \frac{1}{2} a \dot{\phi}^2, \quad (3.78)$$

где a – инерционный коэффициент системы;

Q – обобщенная сила.

Если принять за обобщенную координату угол поворота штанги $q = \phi$, то уравнение (3.77) примет вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \phi} = Q_d,$$

где Q_d – обобщенная диссипативная сила сопротивления амортизаторов:

$$Q_d = -\mu \dot{\phi}, \quad (3.79)$$

где μ – коэффициент сопротивления амортизаторов.

Потенциальная энергия системы состоит только из потенциальной энергии полей сил тяжести ($E_n^r = Pz_c = 0$, так как $z_c = z_0 = 0$).

С учетом зависимостей (3.78) и (3.79), уравнение (3.77) примет вид

$$a\ddot{\varphi} = -\mu\varphi,$$

или

$$a \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -\mu \frac{d\varphi}{dt}. \quad (3.80)$$

Понижая порядок дифференциального уравнения, зависимость (3.80) представим в виде

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{\mu}{a}\omega, \quad (3.81)$$

где ω – угловая скорость штанги.

Разделяя переменные и интегрируя зависимость (3.81), получим

$$\int_0^{\omega} \frac{d\omega}{\omega} = -b \int_0^t dt,$$

или

$$\ln \omega = -bt + C_1, \quad (3.82)$$

где $b = \frac{\mu}{a}$;

C_1 – постоянная интегрирования.

Постоянная интегрирования может быть найдена по начальным условиям. При $t = 0$ зависимость (3.82) примет вид

$$C_1 = \ln \omega_0,$$

где ω_0 – начальная угловая скорость штанги.

Таким образом:

$$\ln \omega = -bt + \ln \omega_0,$$

или

$$\ln \frac{\omega}{\omega_0} = -bt. \quad (3.83)$$

Потенцируя полученное выражение, имеем

$$\omega = \omega_0 e^{-bt} = \omega_0 e^{-\frac{\mu}{a}t},$$

или

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega_0 e^{-bt} = \omega_0 e^{-\frac{\mu}{a}t}. \quad (3.84)$$

Разделяя переменные и интегрируя зависимость (3.84), получим

$$\int_0^{\varphi} d\varphi = \omega_0 \int_0^t e^{-bt} dt,$$

или

$$\varphi = -\frac{\omega_0}{b} e^{-bt} + C_2, \quad (3.85)$$

где C_2 – постоянная интегрирования.

Принимая, что после воздействия штанга получит начальное отклонение на угол φ_0 , по начальным условиям при $t = 0$ из (3.85), получим

$$C_2 = \varphi_0 + \frac{\omega_0}{b},$$

где φ_0 – начальное отклонение штанги.

В конечной форме выражение (3.85) запишется как

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{\omega_0}{b} (1 - e^{-bt}) = \varphi_0 + \frac{\omega_0}{b} \left(1 - e^{-\frac{b}{a}t} \right). \quad (3.86)$$

На основании полученной зависимости можно построить следующие графические зависимости (рис. 3.10).

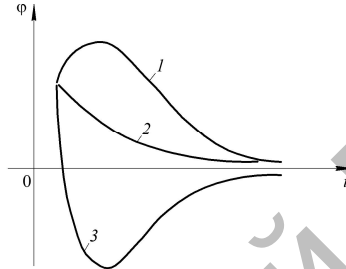


Рис. 3.10. Графическое решение зависимости (3.86):
 1 — $\varphi_0 > 0$; 2 — $\varphi_0 < 0$ (φ_0 мало); 3 — $\varphi_0 < 0$ (φ_0 большое)

Зависимость (3.86) позволяет описать процесс затухающих колебаний штанги в зависимости от коэффициента сопротивления амортизаторов и угла их установки относительно горизонтальной плоскости. При этом следует отметить зависимость угла отклонения штанги от начальных условий: начального угла отклонения и начальной угловой скорости.

3.3.2. Определение параметров колебаний штанги при использовании в системе стабилизации упругих элементов

При движении опрыскивателя по полю может возникнуть случай одновременного наезда колес на препятствие или попадания их в неровность. В результате это приводит к чрезмерному воздействию на штангу, что сказывается на прочности и долговечности ее конструкции, а при большой амплитуде колебаний ее концов может привести к поломке.

Система навешивания и стабилизации штанги (рис. 3.11) состоит из свободно перемещающейся в направляющих рамы 2 подвижной рамки 7, закрепленной на штоке гидроцилиндра 4, нижний конец которого крепится на пластине 3, которая также свободно перемещается в направляющих. Направляющие выполнены в виде швеллера, обращенного вовнутрь. Пластина нижней частью опирается на две вертикальные пружины 1, соединенные с рамой опрыскивателя. Данное конструктивное исполнение позволяет обеспечить подвижной рамке одну степень свободы (поступательное движение), гасить колебания системы в вертикальной плоскости и обеспечить плавность хода штанги при наезде одновременно двух колес опрыскивателя на препятствие. Сила трения скольжения (металл по металлу) между подвижной рамкой, пластиной и направляющими рамы позволяет эффективно гасить колебания пружин, избежать раскачивания всей системы. Штанга 5 подвешена шарнирно 8 на подвижной рамке 7 с возможностью свободного перемещения. Гашение колебаний штанги в вертикальной плоскости обеспечивается парой пружин сжатия 1 и амортизаторами 6. При этом штанга совершает сложное движение по отношению к раме опрыскивателя: поступательное – вместе с рамкой в направляющих и вращательное – относительно рамки. При поступательном движении осуществляется гашение колебаний пружинами 1, а при вращательном – амортизаторами 6.

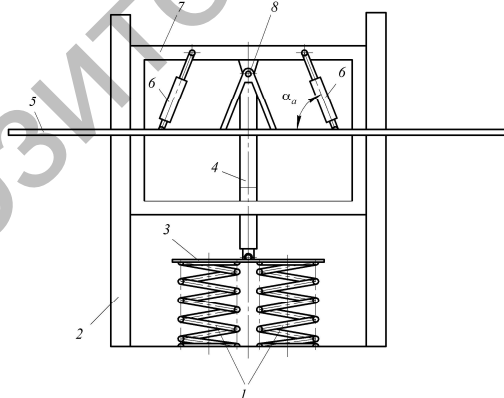


Рис. 3.11. Схема к расчету вертикальных пружин:

- 1 – пара пружин; 2 – рама опрыскивателя; 3 – пластина;
- 4 – гидроцилиндр регулировки высоты установки штанги;
- 5 – штанга; 6 – амортизаторы; 7 – подвижная рамка; 8 – шарнир

Данная система работает следующим образом. При одновременном наезде двух колес опрыскивателя на препятствие (попадание в неровность) возникшие возмущения, не передаваясь штанге, гасятся за счет работы сил упругости элементов 1 и силы трения между подвижной рамкой 7 и направляющими рамы 2. При наезде на препятствие одного из колес опрыскивателя возникающие возмущения частично гасятся упругими элементами 1 и окончательно – амортизаторами б.

Эффективность работы предложенной системы стабилизации определяется характеристиками и параметрами установки пружин и амортизаторов (угол наклона α_a). Рассмотрим процесс колебания системы в вертикальной плоскости и работу пружин. Колебательное поступательное движение системы с одной степенью свободы в вертикальной плоскости может быть описано уравнением Лагранжа 2-го рода [91–96, 116]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q} = Q_n + Q_r, \quad (3.87)$$

где E_k – кинетическая энергия системы:

$$E_k = \frac{1}{2} a \dot{q}^2 = \frac{1}{2} m v_c^2 = \frac{1}{2} m \dot{q}^2 = \frac{1}{2} m \dot{q}^2, \quad (3.88)$$

где a – коэффициент инерции системы ($a = m$, m – масса системы);
 Q_n – обобщенная потенциальная сила двух параллельных пружин;
 Q_r – обобщенная сила трения.

Обобщенная потенциальная сила двух параллельных пружин

$$Q_n = - \frac{\partial E_n}{\partial q_2}, \quad (3.89)$$

где E_n – потенциальная энергия системы.

Для принятых обобщенных координат $q = z$, при этом потенциальная энергия

$$E_{\text{п}} = \frac{2cq^2}{2} = \frac{2cz^2}{2} = cz^2,$$

где $2c$ – жесткость пары пружин (c – жесткость одной пружины).

Откуда

$$Q_{\text{п}} = -2cz. \quad (3.90)$$

Предположим, что величина силы трения рамки в направляющих не зависит от скорости, тогда имеем случай обобщенной силы кулоновского трения, которая может быть представлена в виде

$$Q_{\text{т}} = Q_{\text{к}} = -\mu \operatorname{sgn} \dot{z} = -\mu \operatorname{sgn} \dot{x} \quad (3.91)$$

где μ – обобщенный коэффициент сопротивления системы.

С учетом (3.88), (3.90) и (3.91), уравнение (3.87) примет вид

$$m\ddot{z} = -2cz - \mu \operatorname{sgn} \dot{z},$$

или

$$\ddot{z} + k^2 z + b \operatorname{sgn} \dot{z} = 0, \quad (3.92)$$

где $b = \frac{\mu}{m}$;

$$k = \sqrt{\frac{2c}{m}}.$$

Знак в последнем члене уравнения (3.92) определяется знаком скорости \dot{z} .

Пусть, например, после толчкового возмущения система отклонится от положения равновесия на величину $z = A_0$. Примем данное положение за начальное, приняв $t = 0$ и $\dot{z} = 0$, и рассмотрим движение, начиная от этого положения. Тогда в первом интервале движения

скорость отрицательная, и в (3.92) перед третьим членом должен быть принят знак «минус». Для этого интервала уравнение (3.92) представим в виде

$$k^2 z - b = 0. \quad (3.92a)$$

Решения данного неоднородного дифференциального уравнения ищем в виде

$$z = z_1 + z_2,$$

где z_1 – общее решение однородного уравнения $k^2 z = 0$, имеет вид

$$z_1 = C_1 \sin kt + C_2 \cos kt, \quad (3.93)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования, определяются начальными условиями.

Частное решение (3.92a) z_2 ищем в виде $z_2 = B$. Решим (3.92a) относительно z_2 и получим:

$$k^2 B = b, \text{ откуда } B = \frac{b}{k^2}.$$

Тогда общее решение (3.92a) имеет вид

$$z = C_1 \sin kt + C_2 \cos kt + \frac{b}{k^2}, \quad (3.94)$$

а уравнение для скорости

$$\dot{z} = C_1 k \cos kt - C_2 k \sin kt. \quad (3.95)$$

Принимая во внимание, что при $t = 0$, $z_0 = A_0$ и $\dot{z}_0 = 0$, из (3.94) находим

$$C_2 = A_0 - \frac{b}{k^2}, \quad (3.96)$$

а из (3.139) – $C_1 = 0$.

Окончательно решение (3.92а) принимает вид:

$$z = \left(A_0 - \frac{b}{k^2} \right) \cos kt + \frac{b}{k^2}. \quad (3.97)$$

$$\dot{z} = - \left(A_0 - \frac{b}{k^2} \right) k \sin kt. \quad (3.98)$$

Через промежуток времени, когда произведение kt будет равно π ($kt = \pi$), скорость \dot{z} еще раз обращается в нуль. Это значит, что система достигает своего наибольшего отклонения по другую сторону от состояния равновесия и, соответственно, от начала координат. Согласно (3.97), величина этого отклонения

$$A_1 = \left(A_0 - \frac{b}{k^2} \right) \cos \pi + \frac{b}{k^2} = -A_0 + \frac{2b}{k^2}. \quad (3.99)$$

Таким образом, по абсолютной величине данное отклонение меньше первоначального на $\frac{2b}{k^2}$.

Если величина A_1 такая, что $2c|A_1| > \mu$, то есть $k^2|A_1| > b$ (или $|A_1| > \frac{b}{k^2}$), то сила упругости больше силы трения, и система начнет двигаться обратно в сторону положительного значения z . Тогда для второго интервала движения, когда скорость положительная ($\dot{z} > 0$) в (3.92) перед b должен быть принят знак «плюс», и уравнение движения запишется в виде

$$\ddot{z} + k^2 z + b = 0. \quad (3.92б)$$

Принимая начало отсчета времени со второго интервала, начальные условия представим так: $t = 0$, $z_0 = A_1$, $\dot{z} = 0$. В этом случае общее решение (3.92б) примет вид

$$z = C'_1 \sin kt + C'_2 \cos kt - \frac{b}{k^2}, \quad (3.100)$$

и скорость

$$\dot{z} = C'_1 k \cos kt - C'_2 k \sin kt - \frac{b}{k^2}. \quad (3.101)$$

С учетом начальных условий на втором интервале движения, при $t = 0$, из уравнения (3.100) получим

$$C'_2 = A_1 + \frac{b}{k^2} \quad \text{и} \quad C'_1 = 0 \quad (3.102)$$

и окончательно решение (3.100) запишем в виде

$$z = \left(A_1 + \frac{b}{k^2} \right) \cos kt - \frac{b}{k^2}. \quad (3.103)$$

Тогда в конце второго интервала движения (еще раз при $kt = \pi$) из (3.103) получим следующее отклонение:

$$A_2 = -A_1 - \frac{2b}{k^2}. \quad (3.104)$$

С учетом (3.99), найдем изменение отклонения системы от равновесия за полный период 2π :

$$A_2 = A_0 - \frac{4b}{k^2}. \quad (3.105)$$

Аналогичным образом можно показать, что амплитуда за все последующие периоды уменьшается на одну и ту же величину $\frac{4b}{k^2}$,

то есть последовательность амплитуд образует арифметическую последовательность для огибающей кривой $z(t)$, которую можно записать в виде дифференциального уравнения

$$\frac{dA}{dt}T = -\frac{4b}{k^2}, \quad (3.106)$$

где T – период колебаний.

Интегрируем зависимость (3.106):

$$\int_{A_0}^A dA = -\frac{4b}{k^2T} \int_0^t dt.$$

Получим уравнение для огибающей кривой $z(t)$:

$$A = A_0 - \frac{4b}{k^2T}t = A_0 - \frac{2\mu}{cT}t, \quad (3.107)$$

представляющей собой прямую линию (рис. 3.12).

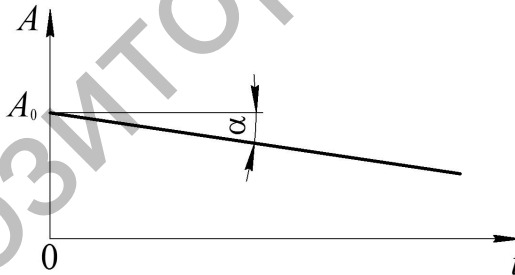


Рис. 3.12. График огибающей прямой

Из зависимости (3.107) видно, что угол наклона огибающей прямой к оси t равен

$$\operatorname{tg}\alpha' = \frac{4b}{k^2T} = \frac{2\mu}{cT}.$$

Движение системы будет продолжаться до тех пор, пока $|A_i| > \frac{b}{k^2}$ (i – номер рассматриваемого цикла). Если $|A_i| < \frac{b}{k^2}$, тогда сила упругости меньше $2cA_i$, и движение системы прекращается.

С учетом (3.97) и (3.103), график колебаний будет состоять из отрезков синусоиды с одинаковым периодом и убывающей амплитудой (рис. 3.13). Две горизонтальные прямые $z = \pm \frac{b}{k^2}$ задают зону застоя. Если скорость обращается в нуль в пределах этой зоны, то движение системы прекращается (точка M). При эффективной работе системы стабилизации штанги точка M должна быть как можно ближе к началу координат ($t \rightarrow 0$), и колебательное движение будет затухать за один цикл.

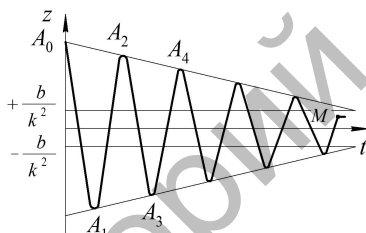


Рис. 3.13. График колебаний системы

Логарифмический декремент затухающих колебаний

$$\delta = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}}. \quad (3.108)$$

Если приращение $\Delta A_i = A_{i+1} - A_i$ мало по сравнению с A_i , то (3.108) можно записать как

$$\delta = \ln \frac{A_{i+1} - A_i}{A_{i+1}} = \ln \left(1 - \frac{\Delta A_i}{A_{i+1}} \right) \approx - \frac{\Delta A}{A}.$$

В нашем случае $\Delta A = -\frac{4b}{k^2}$, тогда

$$\delta \approx \frac{4b}{k^2} \frac{1}{A} \approx \frac{2\mu}{cA}.$$

Таким образом, для случая кулоновского трения логарифмический декремент колебаний увеличивается с уменьшением амплитуды (рис. 3.14).

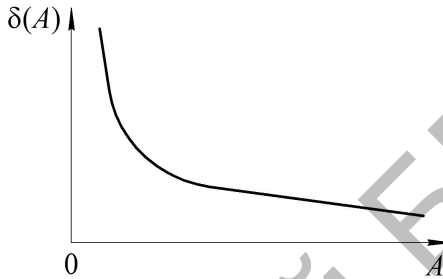


Рис. 3.14. График зависимости логарифмического декремента колебаний от амплитуды

Полученные зависимости позволяют определить параметры колебаний штанги при использовании пары цилиндрических пружин, используемых для гашения колебаний, возникающих при одновременном или попеременном наезде колес на препятствия.

3.3.3. Исследования колебаний штанги при совместном использовании различных демпфирующих элементов

Исследования совместной работы демпфирующих элементов рассмотрим на примере следующей системы (рис. 3.15). Подвижная рамка 3 закреплена на штоке гидроцилиндра 7, нижний конец которого крепится на пластине 4, опирающейся на две вертикальные пружины сжатия 1, которые установлены на раме опрыскивателя 9. Рамка может свободно перемещаться в направляющих рамы опрыскивателя. Штанга 6 закреплена на подвижной рамке 3 шарнирным соединением 4, обеспечивающим ее вращательное движение.

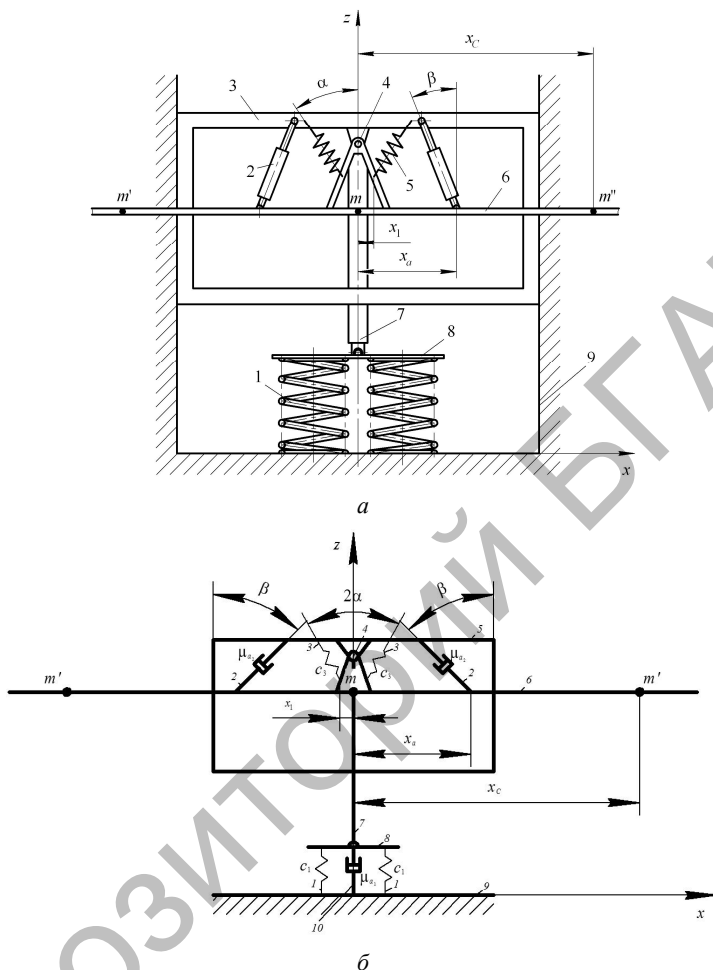


Рис. 3.15. Схемы навески штанги на раме опрыскивателя с системой стабилизации в вертикальной плоскости:
a – конструктивная; *б* – расчетная

Гашение колебаний штанги в вертикальной плоскости обеспечивается пружинами 1, 5 и амортизаторами 2. При этом штанга совершает сложное движение по отношению к раме опрыскивателя: поступательное – вместе с рамкой в направляющих и вращательное – относительно рамки. При поступательном движении

осуществляется гашение колебаний пружинами 1, а при вращательном – амортизаторами 2 и пружинами 5.

Колебательное движение штанги опрыскивателя может быть описано уравнениями Лагранжа 2-го рода [91–69, 117, 118]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \phi} = Q, \quad (3.109)$$

где Q – обобщенная сила.

Разложим движение системы (см. рис. 3.15) на переносное поступательное движение вместе с центром масс штанги и относительное – по отношению к системе координат, движущейся поступательно вместе с этим центром. Тогда, по теореме Кенига, кинетическая энергия системы в абсолютном движении складывается из кинетической энергии центра масс E_k^c , если в нем сосредоточить всю массу движущейся системы, и кинетической энергии штанги E_k^r относительно центра масс [117, 118]:

$$E_k = E_k^c + E_k^r = \frac{1}{2} m v_c^2 + E_k^r, \quad (3.110)$$

где $E_k^c = \frac{1}{2} m v_c^2$;

$$E_k^r = \frac{1}{2} a \dot{\phi}^2,$$

где a – коэффициент инерции;

m – масса системы (навеска, штанга, элементы стабилизации);

v_c – скорость центра масс штанги.

Для поступательного движения части системы в направляющих

$$v_c = v = \dot{x} = \dot{\phi}_2 \quad \text{и} \quad E_k^{(2)} = \frac{m v_c^2}{2} = \frac{m \dot{\phi}_2^2}{2} = \frac{m \dot{\phi}^2}{2}.$$

Уравнение Лагранжа для этого поступательного движения имеет вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k^{(2)}}{\partial \dot{q}_2} \right) - \frac{\partial E_k^{(2)}}{\partial q_2} = Q_n + Q_d, \quad (3.111)$$

где Q_n – потенциальная сила двух параллельных пружин 1 (см. рис. 3.15);

Q_d – диссипативная сила сопротивления амортизатора 2.

Обобщенная потенциальная сила двух параллельных пружин

$$Q_n = -\frac{\partial E_n}{\partial q_2}.$$

Для принятых обобщенных координат $q = z$, при этом потенциальная энергия

$$E_n = \frac{2c_2 q_2^2}{2} = \frac{2c_2 z^2}{2} = c_2 z^2,$$

где $c_2 = 2c_1$, c_1 – жесткость пружины 1 (см. рис 2.17).

Откуда

$$Q_n = -2c_2 z. \quad (3.112)$$

Обобщенная диссипативная сила сопротивления амортизатора

$$Q_d = -\mu_a \dot{q}_2 = -\mu_a \dot{z} \quad (3.113)$$

где μ_a – обобщенный коэффициент сопротивления амортизатора.

С учетом выражения для $E_k^{(2)}$, Q_n и Q_d , уравнение (3.111) примет следующий вид:

$$m\ddot{z} = -2c_2 z - \mu\dot{z}, \quad \text{или} \quad \ddot{z} + 2b\dot{z} + k^2 z = 0, \quad (3.114)$$

где $2b = \frac{\mu}{m}$;

$$k = \sqrt{\frac{2c_2}{m}}. \quad (3.115)$$

Решение дифференциального уравнения (3.114) в зависимости от соотношения между величинами b и k выражается одной из трех формул:

$$z = e^{-bt} A \sin(k_1 t + \alpha) \quad \text{при} \quad b < k, \quad (3.116)$$

где $k_1 = \sqrt{k^2 - b^2}$;

$$z = e^{-bt} (C_1 e^{rt} + C_2 e^{-rt}) \quad \text{при} \quad b > k, \quad (3.117)$$

где $r = \sqrt{b^2 - k^2}$;

$$z = e^{-bt} (C_1 t + C_2) \quad \text{при} \quad b = k, \quad (3.118)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования.

Для описания колебательного движения штанги в уравнении Лагранжа в качестве обобщенной координаты примем угол поворота штанги φ . Тогда уравнение примет вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \varphi} = - \frac{\partial E_n'}{\partial \varphi} + Q_d', \quad (3.119)$$

где E_k – определяется формулой (3.110);

E_n' – потенциальная энергия штанги;

Q_d' – обобщенная сила сопротивления амортизаторов штанги.

Потенциальная энергия системы состоит из потенциальной энергии полей сил тяжести E_{Π}^T и сил упругости E_{Π}^y . $E_{\Pi}^T = Pz_c = 0$, так как $z_c = z_0 = 0$.

Следовательно, $E_{\Pi}' = E_{\Pi}^y$.

$$E_{\Pi}' = -c \int_{z-\lambda_{cr}}^{\lambda_{cr}} z dz - c \int_{z+\lambda_{cr}}^{\lambda_{cr}} z dz = \frac{c}{2} \left[\lambda_{cr}^2 - (z - \lambda_{cr})^2 \right] - \frac{c}{2} \left[\lambda_{cr}^2 - (z + \lambda_{cr})^2 \right] = cz^2, \quad (3.120)$$

где $z = \varphi x_1$, x_1 – расстояние от центральной точки подвеса штанги до точки крепления пружин на штанге.

Действительно, $F = c_3 \Delta S$, $\Delta S = \frac{F}{c_3}$, $F_z = c \Delta z$, $F_z = F \cos \alpha$,

$$\Delta z = \frac{\Delta S}{\cos \alpha} \text{ и}$$

$$c = \frac{F}{\Delta z} = \frac{F \cos \alpha}{\Delta z} = \frac{F \cos^2 \alpha}{\Delta S} = c_3 \cos^2 \alpha, \quad (3.121)$$

где α – угол установки пружин относительно горизонтальной плоскости;

c_3 – жесткость пружины 3 (см. рис. 3.15).

С учетом выражения (3.120), можно записать:

$$Q_{\Pi}' = -\frac{\partial E_{\Pi}'}{\partial \varphi} = -2cx_1^2 \varphi = -c_{\Pi} \varphi, \quad (3.122)$$

где $c_{\Pi} = 2cx_1^2$.

Определим обобщенную силу Q_{Π}' , вызванную силой сопротивления амортизаторов, пропорциональной скорости $\bar{F}_c = -u\bar{v}_a$ (u – коэффициент пропорциональности):

$$Q'_d = \frac{\sum \delta A_k}{\delta \varphi} = -\frac{uv_a \delta z}{\delta \varphi \cos \beta} = -\frac{u \dot{\varphi} x_a^2 \delta \varphi}{\delta \varphi \cos \beta} = -\frac{u \dot{\varphi} x_a^2}{\cos \beta},$$

где $v_a = \dot{\varphi} x_a$ и $\delta z = \delta \varphi x_a$ – скорость и перемещение точки приложения силы \vec{F}_c соответственно;

β – угол установки амортизатора относительно вертикальной оси;

x_a – расстояние от середины штанги до центра точки крепления на ней амортизатора.

$$Q'_d = -\frac{u \dot{\varphi} x_a^2}{\cos \beta} = -\mu' \dot{\varphi} \quad (3.123)$$

где $\mu' = \frac{u x_a^2}{\cos \beta}$.

Очевидно, что в рассматриваемой системе реализуется случай больших сопротивлений $b > k$ и применима зависимость (3.117). В общем случае можно принять, что z стремится к нулю экспоненциально с некоторым коэффициентом n , то есть $z \sim Ce^{-nt}$. Тогда

$$v_c = \dot{z} = -Cne^{-nt} = De^{-nt}, \quad (3.124)$$

где $D = -Cn$,

а кинетическая энергия

$$E_k = \frac{mD^2 e^{-2nt}}{2} + \frac{I_{cy} \dot{\varphi}^2}{2}, \quad (3.125)$$

где I_{cy} – момент инерции относительно оси y .

Принимая во внимание полученные выражения для кинетической энергии и обобщенных сил из уравнения Лагранжа, получим дифференциальное уравнение колебаний штанги:

$$I_{cy} \ddot{\varphi} + \mu' \dot{\varphi} + c_{п} \varphi = Bx_c e^{-nt}, \quad (3.126)$$

где $Bx_c e^{-nt}$ – обобщенная сила переносной силы инерции, которую можно рассматривать как момент пары сил, образованной переносной силой инерции и силой тяжести половины штанги с плечом, равным расстоянию x_c от середины штанги до центра тяжести одной из половин штанги.

Величина переносной силы инерции

$$F_{пер}^u = ma_{пер} = m \ddot{x}_c = mCn^2 e^{-nt} = Be^{-nt},$$

где $B = mCn^2$.

Тогда обобщенная сила переносной силы инерции

$$Q_{пер} = \frac{\sum \delta A_k}{\delta \varphi} = \frac{Be^{-nt} \delta z}{\delta \varphi} = \frac{Be^{-nt} x_c \delta \varphi}{\delta \varphi} = Bx_c e^{-nt}. \quad (3.127)$$

Разделив все члены уравнения (3.126) на I_{cy} , получим неоднородное дифференциальное уравнение

$$\ddot{\varphi} + 2b' \dot{\varphi} + (k')^2 \varphi = B_0 e^{-nt}, \quad (3.128)$$

где $2b' = \frac{\mu'}{I_{cy}}$;

$$k' = \sqrt{\frac{c_{п}}{I_{cy}}};$$

$$B_0 = \frac{Bx_c}{I_{cy}}. \quad (3.129)$$

Неоднородному уравнению (3.128) соответствует однородное уравнение

$$\ddot{\varphi} + 2b' \dot{\varphi} + (k')^2 \varphi = 0. \quad (3.130)$$

Решением неоднородного уравнения (3.128) является функция

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2,$$

где φ_1 – общее решение однородного уравнения (3.130);

φ_2 – частное решение неоднородного уравнения (3.128).

Общее решение φ_1 однородного дифференциального уравнения (3.130) записывается в одной из трех форм в зависимости от соотношений между величинами k' и b' :

$$\text{если } k' < b', \text{ то } \varphi_1 = e^{-b't} (C_1 e^{rt} + C_2 e^{-rt}), \quad (3.131)$$

где $r = \sqrt{(b')^2 - (k')^2}$;

$$\text{если } k' = b', \text{ то } \varphi_1 = e^{-b't} (C_1 t + C_2), \quad (3.132)$$

$$\text{если } k' > b', \text{ то } \varphi_1 = e^{-b't} (C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t), \quad (3.133)$$

где $\omega = \sqrt{(k')^2 - (b')^2}$;

C_1, C_2 – постоянные интегрирования, определяемые начальными условиями.

В результате введения вспомогательного аргумента $\alpha = \arcsin \frac{C_1}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2}}$ функция (3.177) преобразуется:

$$\varphi_1 = e^{-b't} A' \sin(\omega t + \alpha), \quad (3.134)$$

где $A' = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$ – амплитуда колебаний.

Частное решение φ_2 неоднородного уравнения (3.128) следует искать в зависимости от корней характеристического уравнения

$$y^2 + 2b'y + (k')^2 = 0. \quad (3.135)$$

Если число n не является корнем характеристического уравнения (3.135), то частное решение φ_2 следует искать в виде функции

$$\varphi_2 = Q_0 e^{-nt}, \quad (3.136)$$

а если является, то

$$\varphi_2 = Q_0 t e^{-nt}, \quad (3.137)$$

или

$$\varphi_2 = Q_0 t^2 e^{-nt}, \quad (3.138)$$

в зависимости от кратности корня n в характеристическом уравнении (3.135).

Если число n не является корнем характеристического уравнения (3.135), то, подставляя выражение (3.136) в неоднородное уравнение (3.133), получаем

$$Q_0 = \frac{B_0}{n^2 - 2b'n + (k')^2}. \quad (3.139)$$

Таким образом, если $k' < b'$, то

$$\varphi = e^{-b't} (C_1 e^{rt} + C_2 e^{-rt}) + \frac{B_0}{n^2 - 2b'n + (k')^2} e^{-nt}, \quad (3.140)$$

если $k' = b'$, то

$$\varphi = e^{-b't} (C_1 t + C_2) + \frac{B_0}{n^2 - 2b'n + (k')^2} e^{-nt}, \quad (3.141)$$

если $k' > b'$, то

$$\varphi = e^{-b't} A' \sin(\omega t + a) + \frac{B_0}{n^2 - 2b'n + (k')^2} e^{-nt}. \quad (3.142)$$

При $b' \neq k'$ характеристическое уравнение (3.135) имеет два различных корня, следовательно, только один из них может совпасть со значением n . В этом случае подставляем выражение (3.137) в неоднородное уравнение (3.126) и получаем

$$Q_0 = \frac{B_0}{n^2 t - 2b'nt + (k')^2 t + 2b' - 2n}. \quad (3.143)$$

Таким образом, если $k' < b'$, то

$$\varphi = e^{-b't} (C_1 e^{rt} + C_2 e^{-rt}) + \frac{B_0}{n^2 t - 2b'nt + (k')^2 t + 2b' - 2n} t e^{-nt}; \quad (3.144)$$

если $k' > b'$, то

$$\varphi = e^{-b't} A' \sin(\omega t + \alpha) + \frac{B_0}{n^2 t - 2b'nt + (k')^2 t + 2b' - 2n} t e^{-nt}. \quad (3.145)$$

При $b' = k'$ характеристическое уравнение (3.135) имеет один корень кратности двум, следовательно, в случае совпадения последнего со значением n , в неоднородное уравнение (3.133) подставляем (3.138) и получаем

$$Q_0 = \frac{B_0}{n^2 t^2 - 2b'nt^2 + (k')^2 t^2 + 4b't - 4nt + 2}. \quad (3.146)$$

Таким образом, при $b' = k'$ имеем

$$\begin{aligned} \varphi = e^{-b't} (C_1 t + C_2) + \\ + \frac{B_0}{n^2 t^2 - 2b'nt^2 + (k')^2 t^2 + 4b't - 4nt + 2} t^2 e^{-nt}. \end{aligned} \quad (3.147)$$

В результате теоретических исследований гашения колебаний предложенной системой стабилизации получены зависимости для определения характеристик затухающих колебаний штанги в вертикальной плоскости в зависимости от ее конструктивных параметров, характеристик демпфирующих элементов и конструктивных параметров их установки.

Показано, что при определенных числовых значениях геометрических параметров штанги, способа навешивания и гашения ее колебаний происходит изменение не только числовых значений функций, но и самих функций, описывающих процесс движения штанги в вертикальной плоскости, включая случаи резонанса.

3.4. Теоретические исследования влияния колебаний штанги на равномерность распределения рабочего раствора пестицидов по обрабатываемой поверхности

3.4.1. Закономерности падения капель рабочей жидкости

Для анализа изменения равномерности распределения рабочей жидкости по обрабатываемой поверхности рассмотрим, как изменятся параметры движения капель в факеле распыла при наличии колебаний штанги.

Для изучения закономерностей движения капель в воздушной среде примем следующие допущения:

- расчетная форма капли в виде шара;
- капля не меняет своей массы и формы на протяжении всей траектории движения;
- капли в процессе движения не соударяются и не сливаются;
- силы сопротивления полету капель в воздушной среде пропорциональны квадрату скорости и зависят от ряда параметров воздуха и жидкости.

Для нашего случая исследование закономерностей движения капель в воздушной среде может быть сведено к определению параметров их падения: скорость и координаты падения на обрабатываемую поверхность.

Рассмотрим механизм движения капли от сопла распылителя до обрабатываемой поверхности. Капля, оторвавшись от выброшенной из сопла распылителя струи жидкости, обладая запасом кинетической энергии, замедленно движется под действием движущей силы (силы тяжести) и силы сопротивления среды. Спустя некоторое время, когда эти силы взаимно уравниваются, она достигает конечной скорости и движется по определенной траектории, параметры которой определяются начальными условиями истечения жидкости из сопла и состоянием окружающей среды.

Капля жидкости M массой m_k , выброшенная из сопла распылителя в окружающую среду со скоростью v_{k0} под углом γ_{p0} к вертикали, совершает дальнейшее движение под действием сил тяжести G_k и лобового сопротивления воздуха F_c [4, 119]. Сила лобового сопротивления направлена по касательной к траектории полета в сторону, противоположную направлению движения, и является заданной функцией скорости капли v_k :

$$F_c = -k_\lambda v_k^2,$$

где k_λ – приведенный коэффициент сопротивления.

Сила тяжести, действующая на каплю, определяется по формуле

$$G_k = m_k g,$$

где g – ускорение свободного падения.

Закономерности движения капель рабочего раствора пестицида можно получить, используя принципы интегрирования и дифференцирования [4, 119].

Рассмотрим распылитель, закрепленный на штанге опрыскивателя, удаленный от точки подвески штанги на расстояние $l_{OA} = l_p$. Для исследования закономерностей движения капли свяжем с ней неподвижную (декартову) систему координат – xOz , начало которой поместим в точку вылета капли из сопла распылителя O (рис. 3.16).

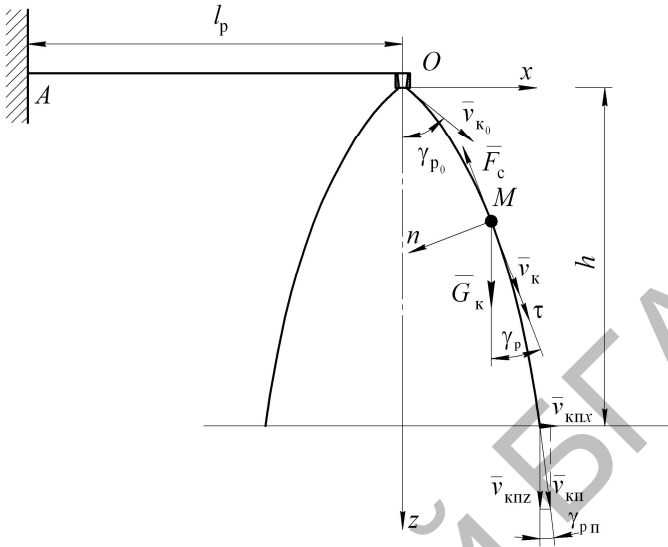


Рис. 3.16. Расчетная схема падения капли жидкости в воздушной среде

Уравнения движения капли вдоль осей будут иметь вид:

$$Ox: m_k \frac{dv_{kx}}{dt} = -k_\lambda v_{kx}^2; \quad (3.148)$$

$$Oz: m_k \frac{dv_{kz}}{dt} = m_k g - k_\lambda v_{kz}^2, \quad (3.149)$$

где v_{kx}, v_{kz} – проекции скорости движения капли, соответственно, на оси Ox и Oz :

$$v_{kx} = v_k \cdot \sin \gamma_p;$$

$$v_{kz} = v_k \cdot \cos \gamma_p.$$

Разделив левую и правую части уравнений на m_k , получим:

$$\frac{dv_{kx}}{dt} = -\frac{k_\lambda}{m_k} v_{kx}^2 = -C_T v_{kx}^2; \quad (3.150)$$

$$\frac{dv_{\text{кз}}}{dt} = g - \frac{k_{\lambda}}{m_{\text{к}}} v_{\text{кз}}^2 = g - C_{\text{T}} v_{\text{кз}}^2, \quad (3.151)$$

где C_{T} – отношение приведенного коэффициента сопротивления движению капли к ее массе [120]:

$$C_{\text{T}} = \frac{k_{\lambda}}{m_{\text{к}}} = \frac{\xi S_{\text{к}} \rho_{\text{Г}}}{2m_{\text{к}}},$$

где ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления движению капли в окружающей среде (для тел сферической формы $\xi = 0,5$) [120];

$S_{\text{к}}$ – площадь миделева сечения капли;

$\rho_{\text{Г}}$ – плотность воздуха при нормальных условиях.

Найдем решение (3.150), удовлетворяющее начальным условиям вылета капли из сопла распылителя (при $v_{\text{кк}} = v_{\text{кк}0}$, $t_0 = 0$). Для этого проинтегрируем левую и правую части уравнения

$$\int \frac{dv_{\text{кк}}}{v_{\text{кк}}^2} = -C_{\text{T}} \int dt,$$

или

$$-\frac{1}{v_{\text{кк}}} = -C_{\text{T}} t + C_1 = -C_{\text{T}} t - \frac{1}{v_{\text{кк}0}}, \quad (3.152)$$

где C_1 – постоянная интегрирования. При начальных условиях

$$(v_{\text{кк}} = v_{\text{кк}0}, t_0 = 0) \quad C_1 = -\frac{1}{v_{\text{кк}0}}.$$

Тогда

$$-\frac{1}{v_{\text{кк}}} = -C_{\text{T}} t - \frac{1}{v_{\text{кк}0}}, \quad (3.153)$$

откуда

$$v_{\text{кx}} = \frac{1}{C_T t + \frac{1}{v_{\text{кx}_0}}} = \frac{v_{\text{кx}_0}}{C_T v_{\text{кx}_0} t + 1}. \quad (3.154)$$

Для определения координаты капли на горизонтальной оси Ox уравнение (3.154) представим в следующем виде:

$$v_{\text{кx}} = \frac{dx}{dt} = \frac{v_{\text{кx}_0}}{1 + C_T v_{\text{кx}_0} t},$$

или

$$dx = \frac{v_{\text{кx}_0}}{1 + C_T v_{\text{кx}_0} t} dt. \quad (3.155)$$

Проинтегрируем левую и правую части (3.155) и получим

$$\int dx = \int \frac{v_{\text{кx}_0}}{1 + C_T v_{\text{кx}_0} t} dt,$$

или

$$x = \frac{v_{\text{кx}_0}}{C_T v_{\text{кx}_0}} \ln |1 + C_T v_{\text{кx}_0} t| + C_2 = \frac{1}{C_T} \ln |1 + C_T v_{\text{кx}_0} t|, \quad (3.156)$$

где C_2 – постоянная интегрирования. При начальных условиях ($t_0 = 0$, $x = 0$) $C_2 = 0$.

Представим зависимость (3.156) в следующем виде:

$$e^{C_T x} = 1 + C_T v_{\text{кx}_0} t,$$

определим время t :

$$t = \frac{e^{C_T x} - 1}{C_T v_{Kx_0}}. \quad (3.157)$$

Запишем (3.151) в следующем виде:

$$\frac{dv_{Kz}}{dt} = C_T \left(\frac{g}{C_T} - v_{Kz}^2 \right) = C_T (j^2 - v_{Kz}^2), \quad (3.158)$$

где $j^2 = \frac{g}{C_T}$.

Проинтегрируем левую и правую части (3.158) (для условия $v_{Kz}^2 < j^2$), получим

$$\int \frac{dv_{Kz}}{j^2 - v_{Kz}^2} = C_T \int dt,$$

или

$$\frac{1}{2j} \ln \frac{j + v_{Kz}}{j - v_{Kz}} = C_T t + C_3 = C_T t + \frac{1}{2j} \ln \frac{j + v_{Kz_0}}{j - v_{Kz_0}}, \quad (3.159)$$

где C_3 – постоянная интегрирования. При начальных условиях

$$(v_{Kz} = v_{Kz_0}, t_0 = 0) \quad C_3 = \frac{1}{2j} \ln \frac{j + v_{Kz_0}}{j - v_{Kz_0}}.$$

Обозначим $\eta = \frac{j + v_{Kz_0}}{j - v_{Kz_0}}$, тогда уравнение (3.159) примет вид

$$\frac{1}{2j} \ln \frac{j + v_{\text{кз}}}{j - v_{\text{кз}}} = C_{\text{T}} t + \frac{1}{2j} \ln \eta. \quad (3.160)$$

Запишем (3.160) в следующем виде:

$$\frac{1}{2j} \ln \frac{j + v_{\text{кз}}}{\eta(j - v_{\text{кз}})} = C_{\text{T}} t,$$

или

$$\ln \frac{j + v_{\text{кз}}}{\eta(j - v_{\text{кз}})} = 2j C_{\text{T}} t. \quad (3.161)$$

Преобразуем (3.161), получим

$$\frac{j + v_{\text{кз}}}{j - v_{\text{кз}}} = \eta e^{2j C_{\text{T}} t},$$

или

$$j + v_{\text{кз}} = \eta j e^{2j C_{\text{T}} t} - \eta v_{\text{кз}} e^{2j C_{\text{T}} t}.$$

$$v_{\text{кз}} (\eta e^{2j C_{\text{T}} t} + 1) = j (\eta e^{2j C_{\text{T}} t} - 1).$$

Откуда скорость капли вдоль оси Oz

$$v_{\text{кз}} = \frac{j (\eta e^{2j C_{\text{T}} t} - 1)}{\eta e^{2j C_{\text{T}} t} + 1}. \quad (3.162)$$

Для определения координаты капли на оси Oz представим (3.162) в следующем виде:

$$v_{\text{кз}} = \frac{dz}{dt} = \frac{j (\eta e^{2j C_{\text{T}} t} - 1)}{\eta e^{2j C_{\text{T}} t} + 1}. \quad (3.163)$$

Проинтегрируем левую и правую части зависимости (3.163), получим

$$\int dz = \int \frac{j(\eta e^{2jC_\tau t} - 1)}{\eta e^{2jC_\tau t} + 1} dt = \int \frac{j\eta e^{2jC_\tau t}}{1 + \eta e^{2jC_\tau t}} dt - \int \frac{j}{1 + \eta e^{2jC_\tau t}} dt. \quad (3.164)$$

Используя формулы интегрирования [121], получим

$$\begin{aligned} z &= \frac{j\eta}{2jC_\tau\eta} \ln|1 + \eta e^{2jC_\tau t}| - j \left[\frac{t}{1} - \frac{1}{2jC_\tau} \ln|1 + \eta e^{2jC_\tau t}| \right] + C_4 = \\ &= \frac{j\eta}{2jC_\tau\eta} \ln|1 + \eta e^{2jC_\tau t}| - jt + \frac{j}{2jC_\tau} \ln|1 + \eta e^{2jC_\tau t}| + C_4 = \quad (3.165) \\ &= \frac{1}{C_\tau} \ln|1 + \eta e^{2jC_\tau t}| - jt + C_4, \end{aligned}$$

где C_4 – постоянная интегрирования.

При начальных условиях ($z_0 = 0$, $t_0 = 0$) постоянная интегрирования

$$C_4 = -\frac{1}{C_\tau} \ln|1 + \eta|. \quad (3.166)$$

Тогда выражение (3.164) примет вид

$$z = \frac{1}{C_\tau} \ln|1 + \eta e^{2jC_\tau t}| - jt - \frac{1}{C_\tau} \ln|1 + \eta|, \quad (3.167)$$

или

$$z = \frac{1}{C_\tau} \ln \left| \frac{1 + \eta e^{2jC_\tau t}}{1 + \eta} \right| - jt. \quad (3.168)$$

Зная начальные условия вылета капли из сопла распылителя и состояние окружающей среды, используя зависимости (3.154), (3.156), (3.163) и (3.168), с большой точностью можно определить координаты положения капли и величину скорости ее движения в воздушной среде.

Единственный, но существенный недостаток уравнений (3.148) и (3.149) состоит в том, что в левых частях записаны производные по времени от проекций скорости на координатные оси, а в правых – произведение квадрата полной скорости на косинус (синус) угла между вектором скорости и одной из перечисленных осей, то есть произведение двух независимых переменных в разных степенях. Методы решения задачи о движении материальной точки под действием сил, зависящих от квадрата скорости, являются приближенными.

Положение материальной точки в инерционной системе отсчета может описываться дифференциальными уравнениями относительно неподвижных (декартовых) или подвижных (естественных) осей координат. При этом на различных этапах проведения исследований можно использовать как подвижные, так и неподвижные оси координат. Из теоретической механики [122, 123] известны методы точного решения поставленной задачи.

Для исследования закономерностей движения капли свяжем с ней естественную (подвижную) систему координат τMn , а неподвижную (декартову) – xOz – поместим в точку вылета O (см. рис. 3.16).

Уравнения движения точки M в естественной системе координат будут иметь вид [4, 124, 125]:

$$m_k \frac{dv_k}{dt} = m_k g \cdot \cos \gamma_p - k_\lambda v_k^2; \quad (3.169)$$

$$m_k \frac{v_k^2}{r} = m_k g \cdot \sin \gamma_p, \quad (3.170)$$

где r – радиус кривизны траектории точки M в заданный момент времени;

γ_p – угол, который в данный момент образует вектор скорости точки M времени с осью Oz .

Разделим левую и правую части уравнений m_k :

$$\frac{dv_k}{dt} = g \cdot \cos \gamma_p - \frac{k_\lambda}{m_k} v_k^2 = g \cdot \cos \gamma_p - C_T v_k^2; \quad (3.171)$$

$$\frac{v_k^2}{r} = g \cdot \sin \gamma_p. \quad (3.172)$$

Замечая, что бесконечно малому перемещению ds точки M по траектории соответствует бесконечно малый угол $d\gamma_p$, который образуется между касательными в двух смежных точках (угол смежности [126]), выразим кривизну через угол смежности

$$k = \frac{1}{r} = -\frac{d\gamma_p}{ds} = -\frac{d\gamma_p}{dt} \frac{dt}{ds} = -\frac{1}{v_k} \frac{d\gamma_p}{dt}. \quad (3.173)$$

В зависимости (3.173) знак « \rightarrow » указывает, что угол γ_p убывает с увеличением длины дуги ds . Подставив (3.173) в (3.172), после соответствующих преобразований получим

$$\frac{d\gamma_p}{dt} = -\frac{g \cdot \sin \gamma_p}{v_k}. \quad (3.174)$$

Из уравнения (3.174) определим время перемещения точки M по дуге длиной ds :

$$dt = -\frac{v_k d\gamma_p}{g \cdot \sin \gamma_p}. \quad (3.175)$$

Подставив (3.175) в (3.171), исключим из него параметр t и получим

$$\frac{dv_k}{d\gamma_p} = -\frac{v_k \cdot \cos \gamma_p}{\sin \gamma_p} + \frac{C_T v_k^3}{g \cdot \sin \gamma_p}. \quad (3.176)$$

Приводим к общему знаменателю уравнение (3.176) и получим

$$\frac{dv_k}{d\gamma} \cdot \sin \gamma_p + v_k \cdot \cos \gamma_p = \frac{C_T v_k^3}{g}. \quad (3.177)$$

Левая часть выражения (3.177) представляет собой производную сложной функции вида $\Phi = U V$, следовательно, ее можно представить в виде

$$\frac{dv_k}{d\gamma_p} \cdot \sin \gamma_p + v_k \cdot \cos \gamma_p = \frac{d(v_k \cdot \sin \gamma_p)}{d\gamma_p}. \quad (3.178)$$

С учетом (3.178) уравнение (3.177) примет вид

$$\frac{d(v_k \cdot \sin \gamma_p)}{d\gamma_p} = \frac{C_T v_k^3}{g}. \quad (3.179)$$

Левую и правую части уравнения (3.179) разделим на произведение $v_k^3 \cdot \sin^3 \gamma_p$:

$$\frac{d(v_k \cdot \sin \gamma_p)}{(v_k \cdot \sin \gamma_p)^3} = \frac{C_T}{g} \frac{d\gamma_p}{\sin^3 \gamma_p}. \quad (3.180)$$

Найдем решение уравнения (3.180), удовлетворяющее начальным условиям вылета капли из сопла распылителя (при $v_k = v_{k0}$; $\gamma_p = \gamma_{p0}$). Для этого левую и правую части уравнения проинтегрируем в заданных пределах:

$$\int_{v_{k0} \cdot \sin \gamma_{p0}}^{v_k \cdot \sin \gamma_p} \frac{d(v_k \cdot \sin \gamma_p)}{(v_k \cdot \sin \gamma_p)^3} = \frac{C_T}{g} \int_{\gamma_{p0}}^{\gamma_p} \frac{d\gamma_p}{\sin^3 \gamma_p}. \quad (3.181)$$

В соответствии со свойствами интеграла, левая часть выражения (3.181) представляет собой табличный интеграл от степенной функции, а правая – табличный интеграл от степенной тригонометрической функции. После интегрирования выражения (3.181) в заданных пределах получим

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2 \cdot v_{\kappa}^2 \cdot \sin^2 \gamma_p} + \frac{1}{2 \cdot v_{\kappa_0}^2 \cdot \sin^2 \gamma_p} = \\
 & = \frac{C_{\tau}}{g} \left[\left(-\frac{\cos \gamma_p}{2 \cdot \sin^2 \gamma_p} + \frac{1}{2} \ln \operatorname{tg} \left| \frac{\gamma_p}{2} \right| \right) - \right. \\
 & \quad \left. - \left(-\frac{\cos \gamma_{p_0}}{2 \cdot \sin^2 \gamma_{p_0}} + \frac{1}{2} \ln \operatorname{tg} \left| \frac{\gamma_{p_0}}{2} \right| \right) \right]. \quad (3.182)
 \end{aligned}$$

Из (3.182) определим решение (3.181) относительно скорости полета капли в сопротивляющейся среде:

$$\begin{aligned}
 v_{\kappa} = v_{\kappa_0} \cdot \frac{\sin \gamma_{p_0}}{\sin \gamma_p} \left(1 + \frac{C_{\tau}}{g} v_{\kappa_0}^2 \sin^2 \gamma_p \times \right. \\
 \left. \times \frac{\cos \gamma_p}{\sin^2 \gamma_p} - \frac{\cos \gamma_{p_0}}{\sin^2 \gamma_{p_0}} - \ln \left| \frac{\operatorname{tg}(0,5 \gamma_p)}{\operatorname{tg}(0,5 \gamma_{p_0})} \right| \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.183)
 \end{aligned}$$

Следует отметить, что дальнейшее решение задачи по определению текущих координат $x = f(t)$ и $z = f(t)$, а также траектории полета капли $x = f(x)$ не представляется возможным (по причине сложности разделения переменных v_{κ} и γ_p в выражении (3.183)) без существенных упрощений в обосновании модели полета капли в сопротивляющейся среде [4, 127].

Сделаем упрощение не в модели полета капли, а в решении дифференциального уравнения (3.180).

При опрыскивании сельскохозяйственных культур штанговым опрыскивателем наименьшее расстояние между соплом распылителя и обрабатываемой поверхностью составляет 0,5 м. Вылет каплей жидкости из распылителя характеризуется начальной скоростью $v_{к0} = 2...10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, направленной под углом $\gamma_{p0} = 20...25^\circ$ к вертикали. В момент соприкосновения капли с обрабатываемой поверхностью угол между вектором скорости и вертикалью уменьшается не более чем на $5...7^\circ$ [4, 5]. Пользуясь тем, что с изменением угла в этих пределах $\sin \gamma$ изменяется незначительно, принимаем в знаменателе правой части уравнения (3.180) следующее приближенное равенство:

$$\sin^3 \gamma_p \approx \sin \gamma_{p0} \cdot \sin^2 \gamma_p. \quad (3.184)$$

С учетом принятого приближения уравнение (2.181) примет вид

$$\frac{d(v_k \cdot \sin \gamma_p)}{(v_k \cdot \sin \gamma_p)^3} = \frac{C_T}{g \cdot \sin \gamma_{p0}} \frac{d\gamma_p}{\sin^2 \gamma_p}. \quad (3.185)$$

В результате интегрирования уравнения, с учетом начальных условий ($v_k = v_{к0}$; $\gamma_p = \gamma_{p0}$) и последующих преобразований, получим

$$v_k = \frac{v_{к0} \cdot \sin \gamma_{p0}}{\sin \gamma \sqrt{1 + \frac{2C_T}{g} v_{к0}^2 \sin^2 \gamma_{p0} (\text{ctg } \gamma_p - \text{ctg } \gamma_{p0})}}. \quad (3.186)$$

Формула (3.186) определяет приближенное значение скорости полета капли жидкости в сопротивляющейся среде. Сравнение результатов расчета скорости падения капли по (3.183) и (3.186) показывает, что отличие составляет 2,6 % [4, 5].

Достаточно высокая степень точности расчетов по (3.186) позволяет использовать исходное уравнение (3.187) для определения траектории движения капли в сопротивляющейся среде и ее координат в требуемый момент времени. Для определения перемещения точки вдоль оси Ox перепишем данное уравнение в следующем виде:

$$\frac{d\gamma_p}{\sin^2 \gamma_p} = \frac{g \cdot \sin \gamma_{p0}}{C_T} \frac{d(v_k \cdot \sin \gamma_p)}{(v_k \cdot \sin \gamma_p)^3}. \quad (3.187)$$

Проекция скорости точки M на ось Ox связана с ее перемещением вдоль этой оси соотношением

$$v_{kx} = v_k \cdot \sin \gamma_p = \frac{dx}{dt}, \quad (3.188)$$

где dx – проекция перемещения точки M на ось Ox .

Выражение (3.188) приведем к следующему виду:

$$dx = v_k \cdot \sin \gamma_p dt. \quad (3.189)$$

В данную зависимость подставим значение параметра dt , определяемого выражением (3.185). После соответствующих преобразований, получим

$$dx = v_k \cdot \sin \gamma_p \left(-\frac{v_k d\gamma_p}{g \cdot \sin \gamma_p} \right) = -\frac{v_k^2 d\gamma_p}{g}. \quad (3.190)$$

Правую часть (3.190) умножим и разделим на $\sin^2 \gamma_p$, приведя уравнение к виду:

$$dx = -\frac{(v_k \cdot \sin \gamma_p)^2}{g} \frac{d\gamma_p}{\sin^2 \gamma_p}. \quad (3.191)$$

Заметив, что множитель $\frac{d\gamma_p}{\sin^2 \gamma_p}$ выражения (3.191) равен правой части уравнения (3.187), после преобразований получим

$$\begin{aligned}
 dx &= -\frac{(v_k \cdot \sin \gamma_p)^2}{g} \frac{g \cdot \sin \gamma_{p0}}{C_T} \frac{d(v_k \cdot \sin \gamma_p)}{(v_k \cdot \sin \gamma_p)^3} = \\
 &= -\frac{\sin \gamma_{p0}}{C_T} \frac{d(v_k \cdot \sin \gamma_p)}{v_k \cdot \sin \gamma_p}.
 \end{aligned}
 \tag{3.192}$$

После сделанных преобразований, можно определить величину перемещения капли вдоль оси Ox при начальных условиях ($v_k = v_{k0}$; $\gamma_p = \gamma_{p0}$):

$$x = -\frac{\sin \gamma_{p0}}{C_T} [\ln(v_k \cdot \sin \gamma_p) - \ln(v_{k0} \cdot \sin \gamma_{p0})]. \tag{3.193}$$

Зависимость (3.193) можно представить в следующем виде:

$$x = -\frac{\sin \gamma_{p0}}{C_T} \ln \left| \frac{v_{k0} \cdot \sin \gamma_{p0}}{v_k \cdot \sin \gamma_p} \right|, \tag{3.194}$$

или

$$v_k \cdot \sin \gamma_p = v_{k0} \cdot \sin \gamma_{p0} e^{-\frac{x C_T}{\sin \gamma_{p0}}} = v_{k0} \cdot \sin \gamma_{p0} e^{-\eta}, \tag{3.195}$$

где $\eta = \frac{x C_T}{\sin \gamma_{p0}}$.

Для определения закона изменения угла γ_p , подставим в (3.185) вместо $v_k \cdot \sin \gamma_p$ его значение из (3.195). После преобразований получим

$$\begin{aligned}
 \frac{d(v_{k0} \cdot \sin \gamma_{p0} e^{-\eta})}{(v_{k0} \cdot \sin \gamma_{p0} e^{-\eta})^3} &= \frac{d(e^{-\eta})}{(e^{-\eta})^3} \frac{v_{k0} \cdot \sin \gamma_{p0}}{(v_{k0} \cdot \sin \gamma_{p0})^3} = \\
 &= \frac{C_T}{g \cdot \sin \gamma_{p0}} \frac{d\gamma_p}{\sin^2 \gamma_p},
 \end{aligned}
 \tag{3.196}$$

или

$$\frac{d\gamma_p}{\sin^2 \gamma_p} = \frac{g}{C_T v_{k_0}^2 \cdot \sin \gamma_{p_0}} \frac{d(e^{-\eta})}{(e^{-\eta})^3}. \quad (3.197)$$

После интегрирования выражения, с учетом начальных условий ($v_k = v_{k_0}$; $\gamma_p = \gamma_{p_0}$), получим

$$-\operatorname{ctg} \gamma_p = -\operatorname{ctg} \gamma_{p_0} + \frac{1}{2} \cdot \frac{g}{C_T v_{k_0}^2 \cdot \sin \gamma_{p_0}} (e^{2\eta} - 1),$$

или

$$\operatorname{ctg} \gamma_p = \operatorname{ctg} \gamma_{p_0} - \frac{1}{2} \cdot \frac{g}{C_T v_{k_0}^2 \cdot \sin \gamma_{p_0}} (e^{2\eta} - 1). \quad (3.198)$$

Уравнение (3.198), наряду с (3.194), показывает, что капля жидкости, выброшенная из сопла распылителя со скоростью v_{k_0} под углом γ_{p_0} к вертикали, не может падать вертикально вниз ($\gamma_p \neq 0$, и координата x не имеет максимума), а будет двигаться по параболе ускоренно до того момента времени, пока скорость ее движения не достигнет предельного значения. Его мы можем определить из уравнения (3.151), приравняв его правую часть к нулю:

$$v_k^* = \sqrt{\frac{g \cdot \cos \gamma_p}{C_T}}. \quad (3.199)$$

Дальнейшее (после достижения предельной скорости) движение капли по траектории будет равномерным, то есть $v_k = v_k^* = \text{const}$.

Из данного уравнения видно, что каплям жидкости различного диаметра будут соответствовать строго определенные значения

предельных скоростей, векторы которых образуют с вертикалью различные предельные углы γ_p^* .

Введем в уравнение (3.198) следующие обозначения:

$$A = \frac{1}{2} \cdot \frac{g}{C_T v_{k0}^2 \cdot \sin \gamma_{p0}}; \quad a = \frac{-2 \cdot C_T}{\sin \gamma_{p0}}; \quad -2\eta = \frac{-2 \cdot C_T x}{\sin \gamma_{p0}} = ax,$$

получим

$$\operatorname{ctg} \gamma_p = \operatorname{ctg} \gamma_{p0} - A(e^{-2\eta} - 1) = \operatorname{ctg} \gamma_{p0} - A(e^{ax} - 1). \quad (3.200)$$

Заменим в данном уравнении $\operatorname{ctg} \gamma_p$ на $\frac{dz}{dx}$, получим

$$\int_0^z dz = \int_0^x \operatorname{ctg} \gamma_{p0} \cdot dx - A \cdot \int_0^x (e^{ax} - 1) dx. \quad (3.201)$$

После интегрирования данного выражения, с учетом начальных условий $z=0$, $x=0$, получим уравнение траектории полета капли в сопротивляющейся среде вдоль оси Oz :

$$z = x \cdot \operatorname{ctg} \gamma_{p0} - A \left[\frac{1}{a} (e^{ax} - 1) - x \right]. \quad (3.202)$$

Представим член уравнения e^{ax} как

$$e^{ax} \approx 1 + \frac{a \cdot x}{1} + \frac{(a \cdot x)^2}{1 \cdot 2} + \frac{(a \cdot x)^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \dots + \frac{(a \cdot x)^n}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot n},$$

или

$$e^{ax} \approx 1 + a \cdot x + \frac{1}{2} (a \cdot x)^2 + \frac{1}{6} (a \cdot x)^3 + \dots + \frac{1}{2^n} (a \cdot x)^n.$$

Тогда (3.202) примет вид

$$z = x \cdot \operatorname{ctg} \gamma_{p_0} - \frac{A}{a} \left(\frac{1}{2} (a \cdot x)^2 + \frac{1}{6} (a \cdot x)^3 \right),$$

или

$$z = x \cdot \operatorname{ctg} \gamma_{p_0} - \frac{A}{2} \cdot a \cdot x^2 - \frac{A}{2} \frac{a^2 \cdot x^3}{3}. \quad (3.203)$$

Подставляя ранее принятые обозначения, получим уравнение кубической параболы с вершиной в точке вылета капли из сопла распылителя:

$$z = x \cdot \operatorname{ctg} \gamma_{p_0} + \frac{g x^2}{2 \cdot v_{k_0}^2 \cdot \sin^2 \gamma_{p_0}} - \frac{1}{3} \frac{g x^3 C_T}{v_{k_0}^2 \cdot \sin^3 \gamma_{p_0}}. \quad (3.204)$$

Совокупность первых двух членов, определяемых координатой x и начальными параметрами вылета капли из сопла и не зависящих от параметра C_T , показывает, что они могут описывать траекторию движения капли без учета сил сопротивления окружающей среды. Третий член уравнения дает поправку на траекторию полета, обусловленную влиянием сопротивления среды, геометрии и массы капли.

Преобразовав зависимости (3.183), (3.193), (3.198), (3.204), с учетом всех принятых обозначений, получим:

$$v_k = v_{k_0} \cdot \frac{\sin \gamma_{p_0}}{\sin \gamma_p} \left(1 + \frac{C_T}{g} v_{k_0}^2 \sin^2 \gamma_p \times \right. \\ \left. \times \frac{\cos \gamma_p}{\sin^2 \gamma_p} - \frac{\cos \gamma_{p_0}}{\sin^2 \gamma_{p_0}} - \ln \left| \frac{\operatorname{tg}(0,5 \gamma_p)}{\operatorname{tg}(0,5 \gamma_{p_0})} \right| \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (3.205)$$

$$x = - \frac{2 \cdot m_k \cdot \sin \gamma_{p_0}}{\xi S_k \rho_k} [\ln(v_k \cdot \sin \gamma_p) - \ln(v_{k_0} \cdot \sin \gamma_{p_0})]; \quad (3.206)$$

$$\gamma = \operatorname{arccctg} \left(\operatorname{ctg} \gamma_{p_0} - \frac{m_k g}{\xi S_k \rho_r \cdot v_{k_0}^2 \cdot \sin \gamma_{p_0}} \left(e^{\frac{x \xi S_k \rho_r}{m_k \cdot \sin \gamma_{p_0}}} - 1 \right) \right); \quad (3.207)$$

$$z = x \cdot \operatorname{ctg} \gamma_{p_0} + \frac{g x^2}{2 \cdot v_{k_0}^2 \cdot \sin^2 \gamma_{p_0}} - \frac{1}{6} \cdot \frac{g x^3 \xi S_k \rho_r}{m_k v_{k_0}^2 \cdot \sin^3 \gamma_{p_0}}. \quad (3.208)$$

Используя зависимости (3.205)–(3.208), можно получить параметры падения капли в идеальных условиях работы (при отсутствии ветра и колебаний штанги). Как уже отмечалось, колеса опрыскивателя во время работы копируют микронеровности поля, в результате чего возникают колебания, передающиеся через раму несущей конструкции штанги, вызывая ее колебания. При этом колебания могут распространяться в трех взаимно перпендикулярных плоскостях: вертикально-продольной, вертикально-поперечной и продольно-поперечной. Направления и параметры колебаний существенным образом сказываются на закономерностях распределения рабочей жидкости по обрабатываемой поверхности.

С учетом возникающих колебаний изменяются начальные параметры вылета капли из сопла, нарушается траектория ее движения (рис. 3.17, 3.18, 3.19).

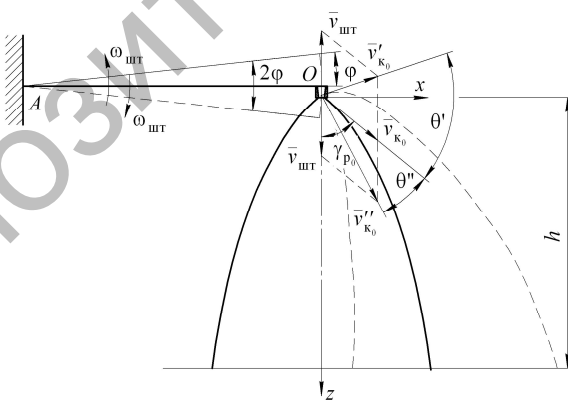


Рис. 3.17. Расчетная схема движения капли с учетом угловых колебаний штанги в поперечно-вертикальной плоскости

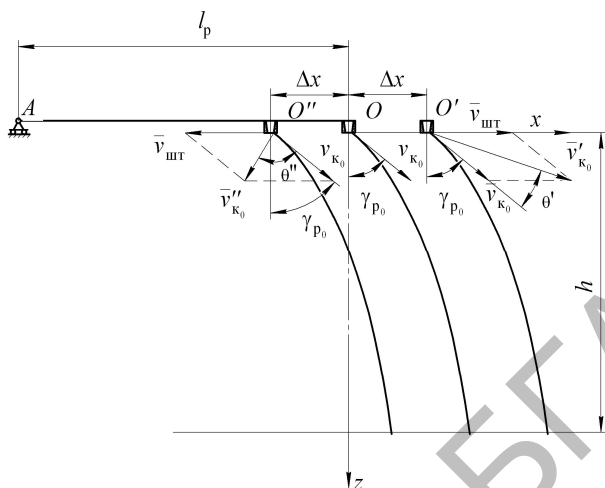


Рис. 3.18. Расчетная схема движения капли с учетом линейных колебаний штанги в поперечно-вертикальной плоскости

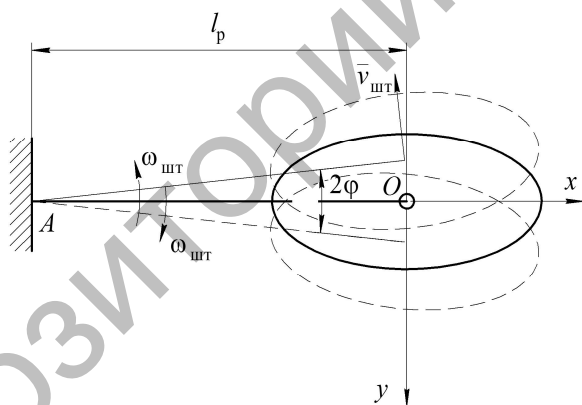


Рис. 3.19. Расчетная схема движения капли с учетом угловых колебаний штанги в горизонтальной плоскости

С учетом вида колебаний в формулы (3.205)–(3.208) необходимо ввести корректирующие члены, учитывающие изменение линейных и угловых координат движения распылителя и величины и направления начальной скорости капли в момент вылета из сопла. При этом, как видно из расчетных схем, на конечный результат

влияние оказывают скорость и направление движения распылителя на колеблющейся штанге, а также величина отклонения штанги от состояния статического равновесия (амплитуда).

Так, при исследовании движения капель в поперечно-вертикальной плоскости следует учитывать отклонение штанги на угол φ , при этом амплитуда колебаний будет равна φl_i . Значит, начальная скорость вылета капли из сопла распылителя $\bar{v}'_{к_0} = \bar{v}_{к_0} + \bar{v}_{ш}$, а начальный угол $\gamma'_{p_0} = \gamma_{p_0} + \theta'$.

В поперечно-вертикальной плоскости учитывается $x' = x + \Delta x$, $\bar{v}'_{к_0} = \bar{v}_{к_0} + \bar{v}_{ш}$ и $\gamma'_{p_0} = \gamma_{p_0} + \theta'$.

С учетом вышесказанного, равенства (3.205)–(3.208) примут следующий вид:

$$v_k = v'_{к_0} \cdot \frac{\sin \gamma'_{p_0}}{\sin \gamma_p} \left(1 + \frac{C_T}{g} v_{к_0}^2 \sin^2 \gamma_p \times \right. \\ \left. \times \frac{\cos \gamma_p}{\sin^2 \gamma_p} - \frac{\cos \gamma'_{p_0}}{\sin^2 \gamma'_{p_0}} - \ln \left| \frac{\operatorname{tg}(0,5 \gamma_p)}{\operatorname{tg}(0,5 \gamma'_{p_0})} \right| \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.209)$$

$$x = - \frac{2 \cdot m_k \cdot \sin \gamma'_{p_0}}{\xi S_k \rho_k} [\ln(v_k \cdot \sin \gamma_p) - \ln(v'_{к_0} \cdot \sin \gamma'_{p_0})]; \quad (3.210)$$

$$\gamma = \operatorname{arccctg} \left(\operatorname{ctg} \gamma'_{p_0} - \frac{m_k g}{\xi S_k \rho_k \cdot v_{к_0}^2 \cdot \sin \gamma'_{p_0}} \left(e^{\frac{x \xi S_k \rho_k}{m_k \cdot \sin \gamma'_{p_0}}} - 1 \right) \right); \quad (3.211)$$

$$z = \Delta x + x \cdot \operatorname{ctg} \gamma'_{p_0} + \frac{g x^2}{2 \cdot v_{к_0}^2 \cdot \sin^2 \gamma'_{p_0}} - \frac{1}{6} \cdot \frac{g x^3 \xi S_k \rho_k}{m_k v_{к_0}^2 \cdot \sin^3 \gamma'_{p_0}}. \quad (3.212)$$

При этом потери рабочей жидкости от колебаний штанги составит объем жидкости, осевшей за обрабатываемой поверхностью при параллельно установленной штанге.

4. МЕХАНИЗМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОСТОЯНСТВА РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ШТАНГОЙ И ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПОЛЯ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ РЕЛЬЕФОМ

4.1. Основные параметры установки штанги относительно обрабатываемой поверхности

В настоящее время во всем мире производится большое количество опрыскивателей, разных по схемам, параметрам и конструктивному исполнению. Это объясняется различиями в их назначении, условиях работы и предъявляемых к ним требованиям.

Наиболее широкое распространение на полях сельскохозяйственных культур нашли штанговые опрыскиватели. В данном типе опрыскивателей рабочая жидкость распределяется по ширине захвата машины при помощи штанги и распыляется непосредственно над обрабатываемым объектом. Следует учитывать, что увеличение ширины захвата приводит не только к повышению производительности агрегата, но и влечет увеличение массы несущей конструкции штанги, снижение ее надежности и качество проведения опрыскивания. Правильная высота установки штанги имеет решающее значение для равномерного распределения рабочего раствора по обрабатываемой поверхности.

Установка штанги относительно обрабатываемого объекта характеризуется двумя основными параметрами: высота установки и угол наклона. Высоту установки выбирают таким образом, чтобы обеспечивалось как минимум двойное перекрытие факела распыла. Для полевых опрыскивателей, в конструкции которых используются щелевые распылители, высота установки штанги может находиться в пределах 30...70 см от выходного сопла до обрабатываемой поверхности. Поэтому, с учетом высоты посевов, конструкция современных опрыскивателей должна обеспечивать подъем штанги до 2,5 м.

Вторым немаловажным параметром, влияющим на равномерность распределения рабочего раствора по обрабатываемой поверхности, является угол установки штанги относительно обрабатываемой поверхности (рис. 4.1 *а, б*).

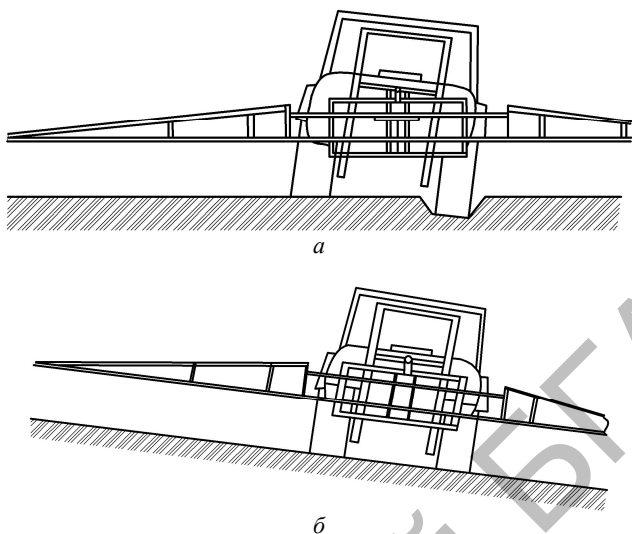
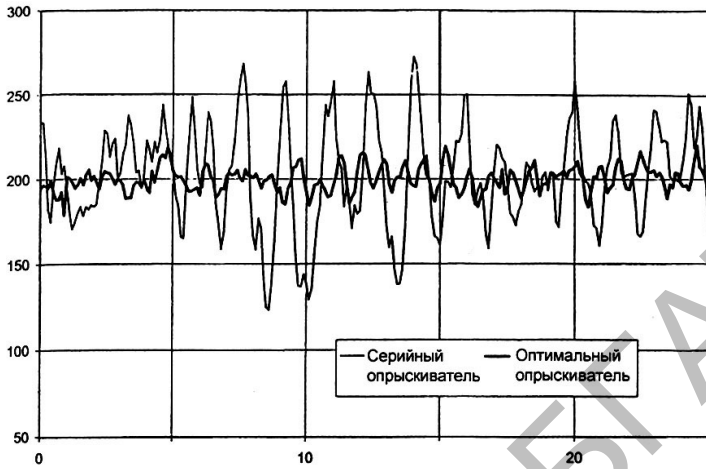


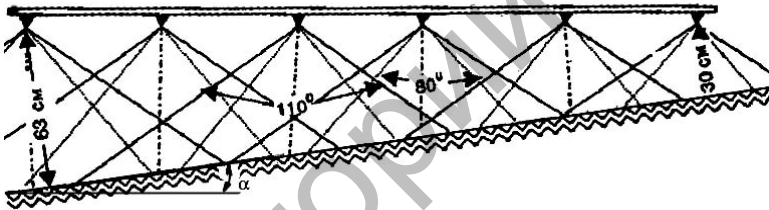
Рис. 4.1. Схема расположения штанги над обрабатываемой поверхностью:
a – при движении колеса в ровности; *б* – при движении по склону

Известно, что эпюра распределения рабочего раствора по обрабатываемой поверхности при параллельном расположении штанги имеет вид, представленный на рис. 4.2, *a* [1]. Однако при обработке склонов, при расположении штанги параллельно горизонту (рис. 4.2, *б*), неравномерность распределения резко возрастает, и эпюра выглядит иным образом (рис. 4.2, *в*). При этом неравномерность тем выше, чем больше угол уклона α . Поэтому необходимо устанавливать на навеске штанги механизм регулировки угла наклона штанги относительно обрабатываемой поверхности.

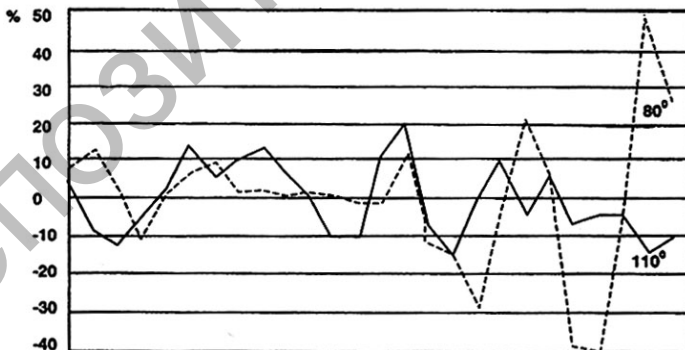
Механизмы механического действия широко используются в конструкциях отечественных опрыскивателей. Они содержат винтовой (пара винтовых) механизм (рис. 4.3), при помощи которого регулируется угол наклона штанги. Недостатками механизмов данной группы являются присутствие ручного труда механизатора и необходимость совершения остановок для регулировки угла положения штанги, что в условиях постоянного изменения рельефа почвы приводит к большим потерям времени на операцию внесения пестицидов, соответственно, к снижению производительности опрыскивателя.



а



б



в

Рис. 4.2. Влияние угла наклона штанги на неравномерность распределения рабочего раствора по ширине захвата



Рис. 4.3. Механизм изменения угла наклона штанги механического действия

Для изменения угла наклона штанги данным способом механизатору необходимо приложить большое усилие, так как вес штанги составляет более 600 кг. Также имеет место большая погрешность параллельности установки штанги.

Кроме того, раствор пестицида обладает активным коррозионным действием, а с учетом того, что при работе агрегатов в полевых условиях образуется пыль, вызывающая забивание резьбовых канавок, винтовые механизмы требуют постоянного ежедневного ухода.

Применение механизмов механического действия не исключает установку системы автоматизированного контроля за положением штанги, но не позволяет автоматически производить регулировку угла наклона штанги.

В конструкциях опрыскивателей широко используются механизмы гидравлического и электрического действия, которые позволяют смещать центр масс штанги влево-вправо относительно точки подвеса.

Система стабилизации опрыскивателей *Goliat* фирмы *Krukowiak* (Польша) дополнительно оборудована сервомотором (рис. 4.4), который регулирует положение штанги относительно склона. В конструкциях опрыскивателей фирмы *Amazone* используется механизм изменения угла наклона штанги электрического действия (рис. 4.5).

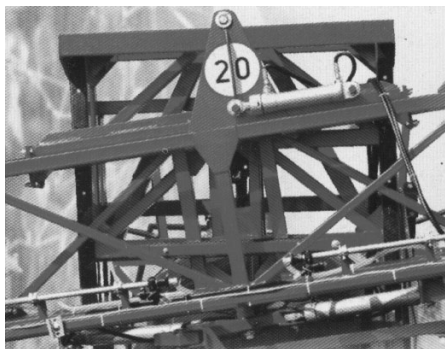


Рис. 4.4. Навеска опрыскивателя *Goliat*



Рис. 4.5. Механизм регулировки угла наклона штанги фирмы *Amazone*

Быстрый и точный наклон, а также возврат в исходное положение производится надежно и просто при помощи пульта управления арматуры из кабины трактора.

Для параллельного копирования местности каждая штанга опрыскивателей *Primus* и *Albatros* фирмы *Lemken* (рис. 4.6) оснащена компенсатором наклона, управление которым осуществляется с блока управления в кабине трактора. Электромотор сдвигает штанги и тем самым смещает центр их тяжести по направлению от склона [51]. Данная система дополнительно может снабжаться электронным потенциометром.

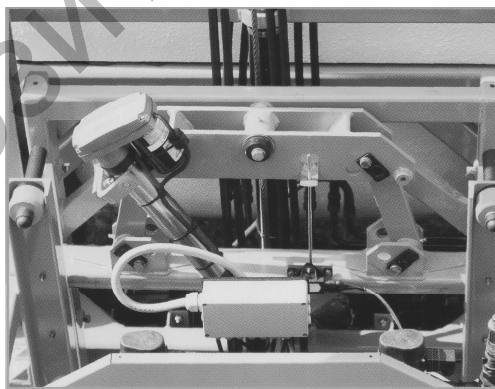


Рис. 4.6. Система контроля опрыскивателя *Albatros* (*Lemken*)

Опрыскиватели фирмы *RAU* оборудованы маятником и маятниковым выравнителем гидравлического действия относительно склона, которые позволяют автоматически установить параллельное расположение штанги относительно обрабатываемой поверхности. При этом автоматика выравнивания штанги включается только при работах на склонах.

Опрыскиватели *Commander* фирмы *Hardi* (Дания) оснащены электрогидравлической системой управления каждой боковой секцией штанги и регулировки угла их наклона (рис. 4.7).

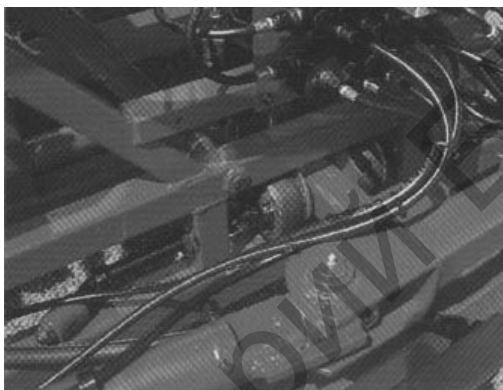


Рис. 4.7. Электрогидравлическая система выравнивания штанги фирмы *Hardi*

Компанией *AG Shield* разработана гидромеханическая система регулирования высоты штанги *GFS* (см. рис. 1.31) [49]. Она основана на установке дополнительных копирующих колес на штангах. Достоинством данной системы является обеспечение постоянного расстояния между распылителями и ровной обрабатываемой поверхностью. Однако при обработках полей с невыровненной поверхностью, сильной засоренностью камнями и при наличии всходов сельскохозяйственных культур она неприемлема.

Система автоматической стабилизации штанги, предложенная фирмой *Matrot* (Франция), также основана на электрогидравлическом действии (рис. 4.8).

Фирма *TeeJet* предлагает широкий спектр датчиков и модулей для контроля и компенсации угла наклона штанги, которые устанавливаются на агрегате и обеспечивают автоматический контроль за положением штанги с высокой степенью точности.

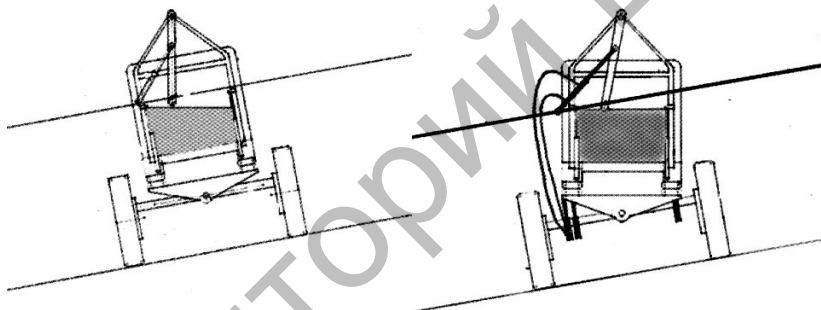


Рис. 4.8. Система установки штанги фирмы *Matrot*

Опрыскиватели фирмы *Bargan* укомплектованы датчиками, которые измеряют расстояние от штанги до земли и позволяют контролировать параллельность расположения штанги. Опрыскиватели фирмы *Evrard* оснащены системой, включающей микрокомпьютерные устройства. Однако существенное усложнение конструкции влечет повышение стоимости самого опрыскивателя [36].

Принцип гидравлического действия используется в конструкции системы стабилизации штанги опрыскивателя (рис. 4.9) [128]. Регулировка угла наклона штанги 1 в данном случае происходит также за счет изменения ее центра тяжести при перемещении груза 2 гидроцилиндром 3.

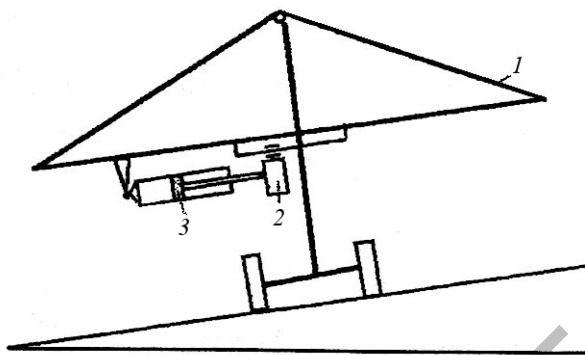


Рис. 4.9. Механизм изменения угла наклона штанги гидравлического действия

Анализируя конструкции механизмов и систем обеспечения регулировки положения распределительной штанги относительно обрабатываемой поверхности, следует отметить, что в настоящее время предпочтение отдается системам автоматизированного контроля, основанным на использовании гидравлических, электрических и гидромеханических механизмов изменения угла наклона штанг.

4.2. Конструкции механизма изменения угла наклона штанги электрического и гидравлического действия

В зависимости от принципа действия механизмы изменения угла наклона штанги подразделяют на механические, электрические, гидравлические и комбинированные. Принцип действия данных механизмов основан на возможности смещения центра тяжести штанги в ту или другую сторону относительно опоры.

Для изменения угла наклона штанги любым из этих способов необходимо приложить большое усилие, чтобы сместить вес штанги, который составляет более 600 кг [36]. При этом механизм должен обеспечивать быстроту изменения штангой угла наклона, а его рабочие элементы – выдерживать кратковременную ударную нагрузку до 100 кг. Кроме этого, необходимо учитывать увеличение цены опрыскивателя по причине модернизации конструкции.

С учетом соотношения стоимости оборудования и исполнительного механизма, разработана и изготовлена конструкция механизма изменения угла наклона штанги, который состоит из следующих элементов (рис. 4.10): реверсируемый электродвигатель 1 (12 В, 120 Вт), предохранительная муфта 2, червячный одноступенчатый редуктор 3 типа 2Ч40-25-57, корпус 4, крепежный фланец 5, исполнительный винтовой механизм 6.

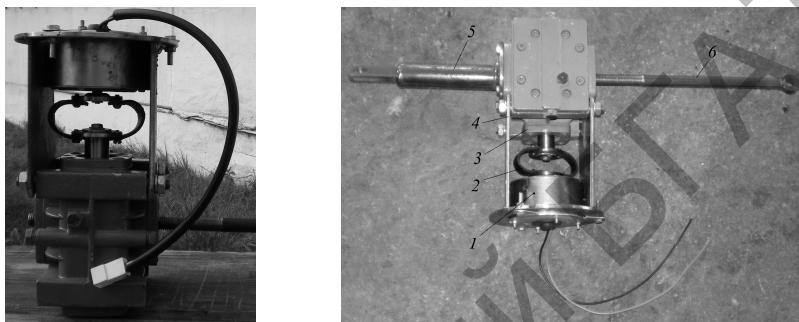


Рис.4.10. Механизм управления штангой опрыскивателя ОШ-2300-18 электрического действия

Механизм изменения угла наклона штанги гидравлического действия основан на рычажном механизме, управляемом при помощи гидроцилиндра (рис. 4.11).

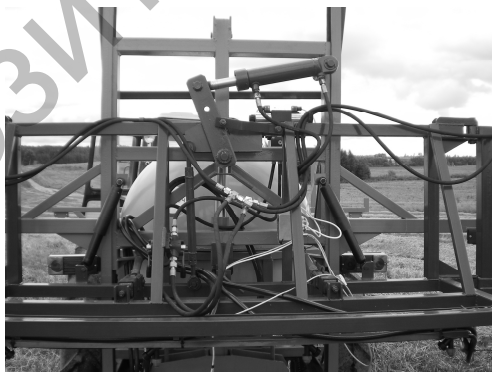


Рис. 4.11. Механизм управления штангой опрыскивателя ОШ-2300-18 гидравлического действия

4.3. Система микропроцессорного автоматизированного управления штангой опрыскивателя (СМАР)

В результате проведенных исследований условий работы и конструкций опрыскивателей [4, 13, 19, 36, 50, 38, 129] были определены требования, которым должна отвечать система микропроцессорного автоматизированного регулирования и ее узлы, а также обоснованы ее технические характеристики (табл. 4.1).

Таблица 4.1. *Технические характеристики системы*

Наименование характеристики	Нормируемое значение
Диапазон измерения, м	0,4...2,0
Погрешность измерения расстояния между штангой и обрабатываемым объектом, м	0,04
Время готовности системы к работе, мин	до 1
Напряжение питающей сети, В	$=12 \pm 2,5$
Выходные параметры сигнала: – напряжение, В – сила тока, А – диапазон регулировки напряжения, В	$=12$ 40 $=6...=14,5$
Продолжительность постоянного измерительного сигнала, после которого вырабатывается управляющее воздействие на исполнительный привод, с	3

В соответствии с предъявленными требованиями была обоснована конструкция системы, которая включает: датчики положения штанги, микропроцессорную электронику обработки измерительной информации и выработки управляющего сигнала, силовую установку (рис. 4.12).

В экспериментальном образце использованы ультразвуковые датчики положения. Выбор данного типа обусловлен слабоискаженным сигналом ультразвуковых датчиков, что связано с образованием в ходе работы опрыскивателя облака распыленной жидкости, через которое должен проходить сигнал. Также этот

выбор оправдывается необходимостью привязки к поверхности поля, а не к растительному покрову. Сигнал, образованный ультразвуковым датчиком, проходит через посеы и, достигнув поверхности поля, отражается. В то время как сигнал, посылаемый оптическим датчиком, искажается облаком рабочего раствора пестицида, достигает растительного покрова и сразу отражается. Кроме того, сила сигнала оптического датчика зависит от удаленности от объекта.

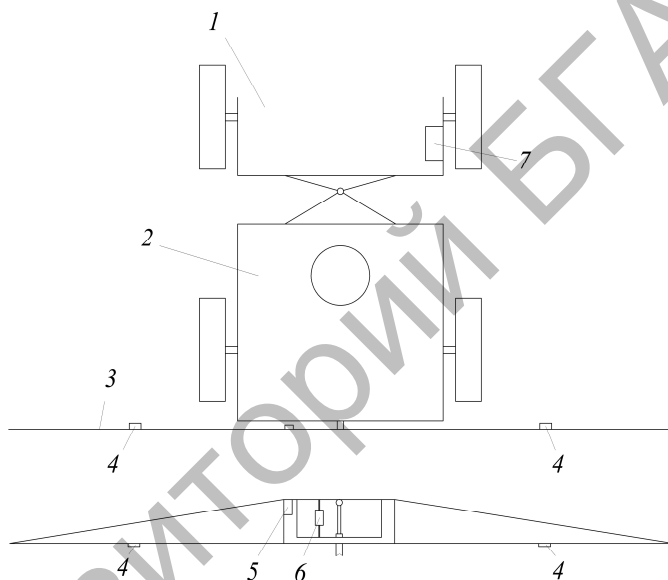


Рис. 4.12. Схема установки элементов системы на энергетическом средстве и машине:

- 1 – энергетическое средство (трактор); 2 – опрыскиватель; 3 – штанга;
- 4 – ультразвуковые датчики положения; 5 – блок управления;
- 6 – механизм управления штангой; 7 – пульт управления

Поэтому в экспериментальном образце системы используются ультразвуковые датчики.

СМАР положения штанги относительно обрабатываемой поверхности управляется из кабины трактора и имеет два режима работы: ручное и автоматическое управление. Ручное управление штангой осуществляется механизатором при помощи регулятора

с пульта управления. Эта функция введена для сокращения времени на установку штанги в рабочее положение на разворотных полосах. В дальнейшем используется функция автоматической регулировки.

При этом в алгоритм работы системы заложены следующие требования:

- 1) погрешность измерения расстояния между штангой и обрабатываемым объектом – 0,04 м;
- 2) диапазон измерения 0,2...2,0 м;
- 3) продолжительность постоянного измерительного сигнала, после которого вырабатывается управляющее воздействие на исполнительный привод, 3 с.

Первое требование введено в связи с вероятной невыровненностью поверхности поля, поэтому в пределах перепадов измерений между двумя датчиками до 0,04 м система изменять положение штанги не будет.

Второе – в соответствии с требованиями изменения высоты установки штанги над обрабатываемой поверхностью, чтобы в этих пределах сила сигнала, подаваемого датчиком, оставалась постоянной.

Третье – с целью исключения случайных сигналов, подаваемых датчиками. Так, например, если на пути сигнала попался камень или временная неровность, то система на них не отреагирует, так как через 3 с повторный сигнал их не обнаружит.

На основании вышеизложенных требований была разработана конструкция системы, включающей 4 блока: блок управления, пульт и два ультразвуковых датчика расстояния.

4.4.1. Принципы и алгоритмы работы элементов системы

Связь между блоками осуществляется по последовательному дифференциальному интерфейсу RS-485 в полудуплексном режиме. Все обмены данными инициирует блок управления, остальные устройства являются подчиненными устройствами. Последовательный интерфейс работает на скорости 19 200 бод, 8 бит данных, 1 старт и 1 стоп бит.

Пульт (рис. 4.13) предназначен для выбора режима работы системы и имеет два органа управления:

- переключатель на два положения для выбора режима работы «Ручной» или «Автоматический»;
- переключатель со средним положением без фиксации для установки положения штанги в ручном режиме.

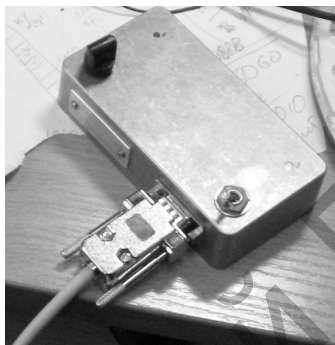


Рис. 4.13. Экспериментальный образец пульта управления

Для подключения пульта управления к блоку управления (контроллеру) используется четырехпроводной кабель.

Пульт управления состоит из управляющего микроконтроллера DD1; драйвера интерфейса RS-485 DD2; переключателя режима работы SA1 с положениями «Выключено», «Ручной», «Автоматический»; переключателя без фиксации для установки положения штанги в ручном режиме SA2; разъема X1 для программирования микроконтроллера. Источник питания выполнен на линейном стабилизаторе напряжения DA1, защищен: от неправильного включения питания диодом VD1, превышения напряжения питания диодом VD4. Для подключения пульта к блоку управления используется разъем XP1.

Алгоритм работы пульта управления следующий (рис. 4.14): микроконтроллер постоянно принимает пакеты данных, ожидая запрос от блока управления. После получения корректного пакета, содержащего в себе адрес устройства, команду и состояние регистра флагов, микроконтроллер производит опрос состояния органов управления и отправляет ответный пакет блоку управления, который содержит текущее состояние переключателей.



Рис. 4.14. Блок-схема алгоритма работы пульта

Ультразвуковой датчик расстояния работает по принципу измерения времени пролета, рабочая частота сенсора 40 кГц. Алгоритм его работы приведен на рис. 4.15. Управляющий микроконтроллер DD1 в непрерывном цикле проводит измерение расстояния: формирует пачку из 16 импульсов с периодом 25 мкс, импульсы через согласующий повышающий трансформатор L1 возбуждают колебания передающего излучателя BF1. Отраженные от препятствий ультразвуковые волны принимаются приемным сенсором BF2 и усиливаются усилителем с фиксированным коэффициентом усиления, выполненным на операционном усилителе DA1.

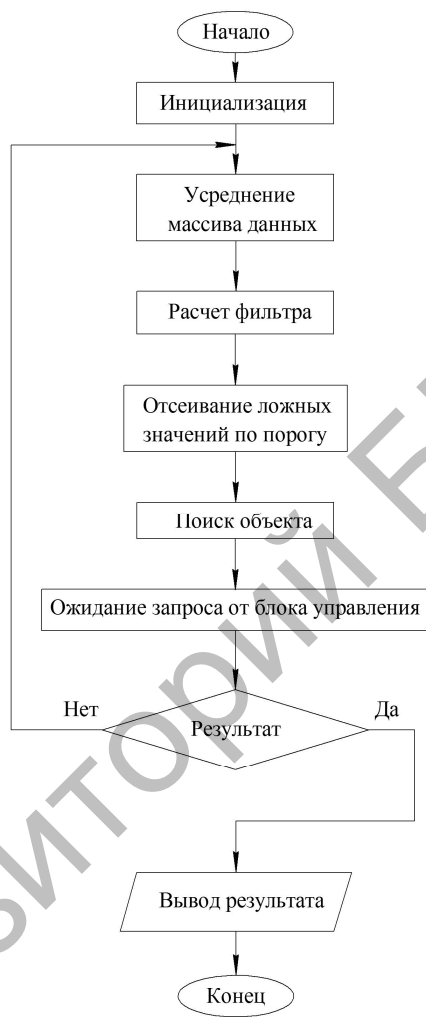


Рис. 4.15. Блок-схема алгоритма работы датчика

Далее эхо усиливается каскадом с переменным усилением, выполненным на операционном усилителе DA4 и цифровом потенциометре DA2, усиление каскада увеличивается со временем, что необходимо для поддержания амплитуды отраженного сигнала, который ослабевает с увеличением расстояния. Далее полученный

сигнал детектируется амплитудным детектором на диоде VD1, фильтруется и поступает на вход АЦП управляющего микроконтроллера. Микроконтроллер через 2 мс после отправки зондирующей пачки импульсов начинает выборки АЦП отраженного сигнала с периодом дискретизации 25 мкс. После обработки полученного массива данных выбирается наиболее вероятное расстояние до препятствия. Данные заносятся в выходной буфер и передаются блоку управления по запросу.

Блок управления (рис. 4.16) является главным управляющим устройством в системе, в его функции включается опрос всех подчиненных устройств, по результатам опроса принимается решение о дальнейших действиях устройства (рис. 4.17).

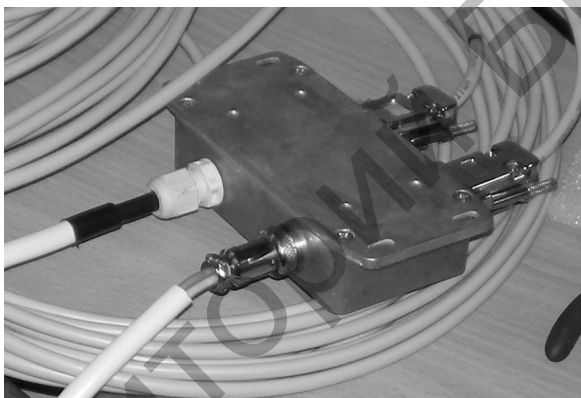


Рис. 4.16. Экспериментальный образец блока управления

Блок управления содержит управляющий микроконтроллер DD1, связанный с ультразвуковыми сенсорами и пультом управления по интерфейсу RS-485 через драйверы DD2 (с ультразвуковыми сенсорами) и DD4 (с пультом управления).

После старта системы блок управления начинает опрос подчиненных устройств. Первым опрашивается пульт управления, после анализа состояния органов управления микроконтроллер анализирует текущий режим работы, если выбран ручной – выполняется перемещение штанги опрыскивателя в выбранном направлении в случае, когда с пульта приходят данные о разрешении этого перемещения.

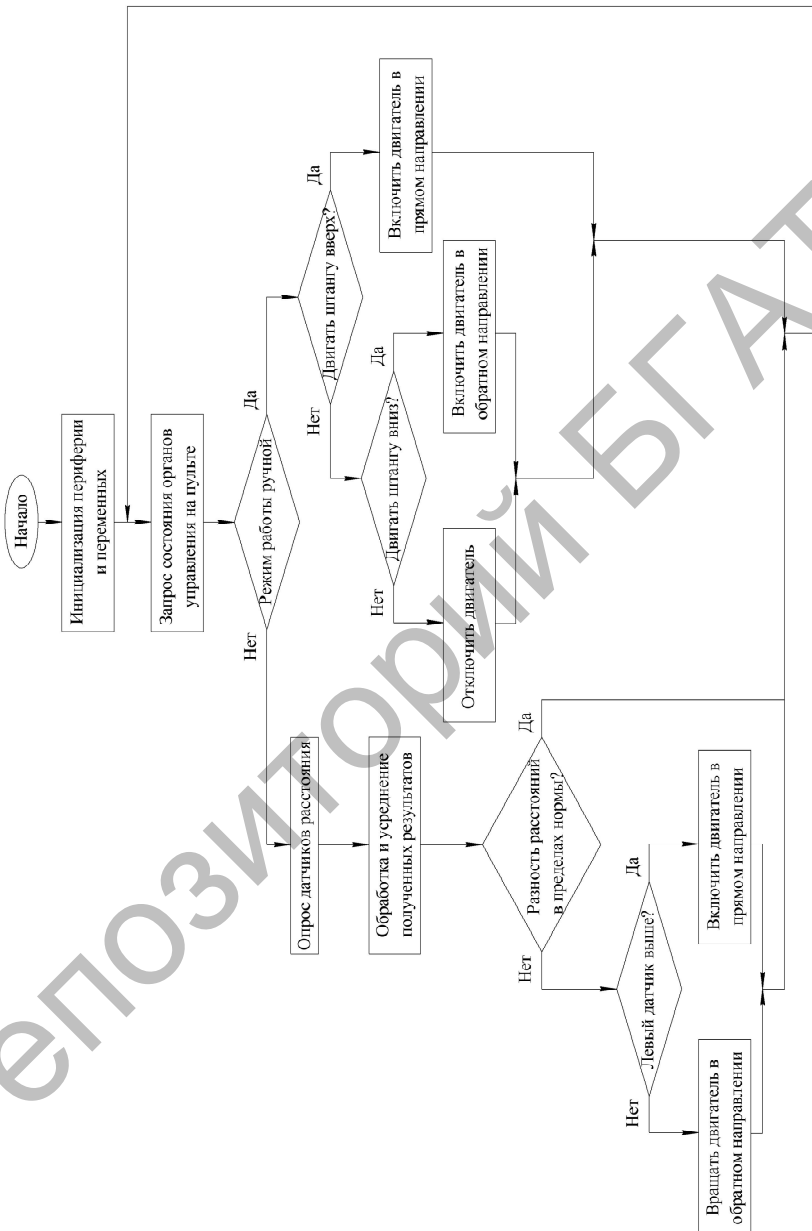


Рис. 4.17. Блок-схема алгоритма работы блока управления

Если выбран режим автоматического слежения, управляющий микроконтроллер производит опрос ультразвуковых датчиков и после анализа полученных данных принимает решение об автоматическом приведении штанги в такое положение, когда расстояния от каждого датчика до препятствия входят в рамки допустимой погрешности. После вышеуказанных действий цикл опроса подчиненных устройств повторяется.

Для управления коллекторным двигателем редуктора используется мостовая схема на транзисторах VT1, VT2, VT7, VT8. Данное решение позволяет вращать ротор двигателя в необходимом направлении.

Источник питания выполнен на линейном стабилизаторе напряжения DA1, защищен: от неправильного включения питания диодом VD1, превышения напряжения питания диодом VD10.

Для испытания системы была разработана конструкция и изготовлена лабораторная установка (рис. 4.18), состоящая из рамы 1, штанги 2, ультразвукового датчика 3, механизма изменения угла наклона штанги 7, блока управления 6, источника постоянного тока 4, соединительных проводов 5 и пульта управления (на рисунке не показан).

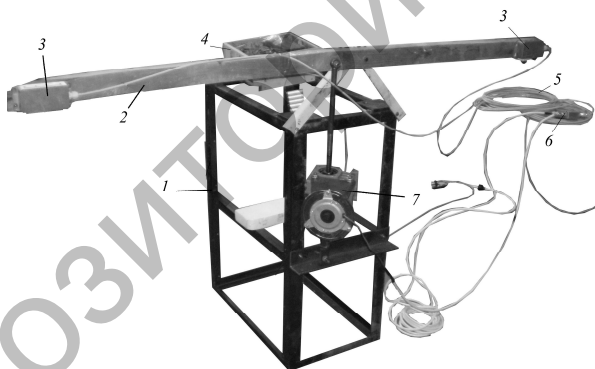


Рис. 4.18. Конструкция лабораторной установки

Работоспособность системы при включенном ручном режиме проверялась реагированием электродвигателя на вращение регулятора в ту или иную сторону.

Работоспособность системы при включенном автоматическом режиме проверялась путем подноса препятствий последовательно и одновременно под левый и правый датчики.

При переводе штанги из транспортного положения в рабочее и обратно проверялась возможность поломки датчиков и правильность складывания соединительных проводов системы, что влияет на их долговечность.

Проверка качества крепления и работы механизма изменения угла наклона штанги (рис. 4.19) определялась визуально при включенном ручном режиме работы системы.

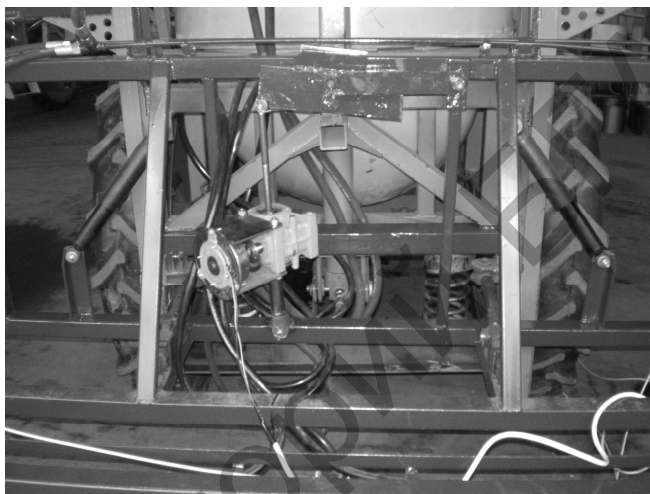


Рис. 4.19. Крепление элементов системы на штанге опрыскивателя

Постоянная скорость вращения винтового механизма проверялась при включенном последовательно ручном и автоматическом режимах визуально. При этом контролировалась также температура корпуса электродвигателя.

Работоспособность датчиков определялась путем появления в зоне действия сигнала посторонних предметов на время, превышающее 3 с.

СМАР была также установлена на опрыскиватель с гидравлическим механизмом изменения угла наклона штанги (см. рис. 4.11).

В результате проведенных приемочных испытаний на ГУ «Белорусская МИС» система рекомендована к использованию на современных опрыскивателях с целью обеспечения параллельности установки штанги относительно обрабатываемой поверхности поля.

5. МЕТОДИКИ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Возможность эффективной эксплуатации полевых штанговых опрыскивателей с наименьшим воздействием на экологию окружающей среды обеспечивается: исключением потерь рабочих растворов пестицидов вследствие протеканий, подтеканий; качественной работой отсекающих устройств распылителей; постоянством расстояния между обрабатываемой поверхностью и распылителями по ширине захвата при выполнении технологического процесса.

5.1. Оборудование для оценки равномерности распределения рабочей жидкости по ширине захвата

В настоящее время разработаны и используются специальные стенды, аппаратура и приборы для тестирования, настройки и диагностики сельскохозяйственных опрыскивателей.

Равномерность распределения рабочего раствора по всей длине штанги или ширине распыления – важный компонент для достижения максимальной эффективности химикатов. Распределение рабочей жидкости можно измерить различными способами. У компаний и некоторых производителей распылителей, а также на исследовательских и экспериментальных станциях есть испытательные стенды для распыления, в которые собирается распыляемая жидкость насадок, располагающихся на стандартизированной или реальной штанге. Эти пробники оснащены несколькими каналами, расположенными перпендикулярно к направлению распылению насадки. По каналам распыляемая жидкость стекает в сосуды для дальнейшего измерения и анализа (рис. 5.1) [131].



Рис. 5.1. Стенды для измерения параметров распылителей

В контролируемых условиях можно выполнить очень точные измерения распределения для оценки и усовершенствования насадок. Измерения распределения можно провести на реальном сельскохозяйственном распылителе. Для статических измерений по всей ширине штанги стенд, аналогичный вышеупомянутому или очень похожий на него, размещается под штангой в зафиксированном положении, а небольшой измерительный стенд перемещается по всей штанге шириной захвата 50 м.

Любая система измерительного стенда представляет собой электронную систему измерения количества воды в каждом канале и расчета объемов. При тестировании качества распределения пользователь получает важную информацию о положении распылителей на штанге. Если требуется более подробная информация о качестве распыления и покрова, можно использовать динамическую систему – распыление окрашенного индикатора. Этот метод можно также применять, если необходимо измерить распределение по всей ширине штанги.

Большинство устройств измерения распределения представляют данные, означающие равномерность по всей длине штанги распылителя. Эти данные могут быть очень показательными даже при визуальном наблюдении. Однако для сравнения широко применяется статистический метод. Основным показателем данного метода является коэффициент вариации v , в котором отражены все данные измерительного стенда и суммированы в простое процентное соотношение, означающее количество вариаций в данном распределении.

Коэффициент вариации вычисляется по формуле

$$v = 10^2 \frac{\sigma}{\bar{Q}},$$

где σ – стандартное отклонение расхода жидкости между отдельными распылителями:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}},$$

\bar{Q} – среднее арифметическое значение расхода жидкости отдельными распылителями по ширине захвата машины:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n},$$

где n – количество распылителей.

Для сокращения времени и затрат труда на проведение исследований используют автоматизированные системы, предназначенные для определения рабочих характеристик распылителей и равномерности распределения рабочего раствора в поперечном направлении по ширине захвата штанги.

Одной из таких систем является стенд *Test 1000*, состоящий из оборудования для тестирования насосов и распылителей (рис. 5.2, а; 5.3) и определения неравномерности распределения рабочей жидкости по ширине захвата опрыскивателя (рис. 5.2, б).



Рис. 5.2. Стенд контроля за техническим состоянием опрыскивателей *Test 1000*:
 а – оборудование для тестирования насосов и распылителей;
 б – оборудование для определения неравномерности распределения рабочей жидкости по ширине захвата



Рис. 5.3. Определение расхода рабочей жидкости через распылитель:
 а – при помощи мерных сосудов; б – при помощи оборудования комплекта *Test 1000*

Стенд состоит из следующих узлов: измерительная тележка с ручьевым столом и мерными цилиндрами; сборная направляющая дорожка, по которой движется тележка; сборник воды; насос для перекачки воды; компьютер; оборудование беспроводной связи между измерительным средством и компьютером; комплект для проверки насосов; прибор для замера.

Ходовые шины состоят из алюминиевых элементов длиной 3000 мм, соединяемых между собой механическими фиксаторами без применения инструмента.

Электронный ручьевой стол предназначен для измерения поперечной неравномерности распределения рабочей жидкости полевых опрыскивателей и изготовлен из 10 алюминиевых V-образных профилей шириной 100 мм, длиной 1510 мм, общей шириной 1020 мм и высотой 120 мм.

Измерительный узел состоит из измерительной тележки, оборудованной ручьевым столом и кусками алюминиевых шин длиной 3 м. С целью преобразования результатов измерений испытаний в графики обязательно подключение измерителя к компьютеру класса *PC Pentium* с печатным устройством. Измерительная тележка выполнена из нержавеющей стали и состоит из следующих узлов: источник напряжения с электродвигателем 12 В; узел измерительных цилиндров; механизм одновременного опорожнения всех измерительных цилиндров, электрически управляемый шаровым краном; пульт для ручной установки тележки и ручного опорожнения измерительных цилиндров; измерительный узел, состоящий из селективно подобранных ультразвуковых датчиков, измерительной электроники и модуля передачи данных способом *ONLINE* (непосредственно). Измерительная тележка автоматически перемещается в заданные позиции измерений через 1000 мм с целью выполнения измерений количества рабочей жидкости.

Пульт ручного управления включает следующие элементы обслуживания: выключатель (включатель) напряжения питания; кнопка для управления спускными кранами; кнопка для управления приводом тележки; кнопка для изменения направления движения тележки.

Элементы обслуживания пульта предназначены как для ручного перемещения тележки и опорожнения мерных цилиндров, так и для контроля механических компонентов измерительной тележки.

Полученные значения измерений поперечного распределения жидкости передатчиком посылаются беспроводным способом в компьютер и мгновенно отображаются на мониторе в графической форме (рис. 5.4).

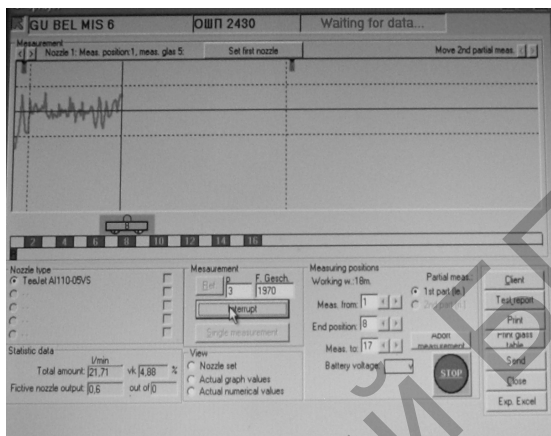


Рис. 5.4. Информация, выводимая на монитор компьютера

После завершения измерений все данные остаются в преобразованном и обработанном виде и записаны на твердом диске компьютера. После введения дополнительных данных, касающихся опрыскивателя (рабочей ширины, емкости бака, оценки технического состояния и т. д.) можно распечатать протокол испытаний и свидетельство, подтверждающее исправность устройства.

При этом следует отметить, что вышеуказанные стенды позволяют исследовать равномерность распределения жидкости по ширине захвата в зависимости от параметров и состояния распылителей, изменения высоты установки штанги над обрабатываемой поверхностью и угла наклона к ней (рис. 5.5).

В процессе проведения исследований влияния колебаний штанги на равномерность распределения рабочей жидкости в лабораторных условиях, штанги обычно встряхиваются или перемещаются для имитации реальных полевых условий и условий распыления. В процессе перемещения навешенная штанга подвергается воздействию возмущающей силы при встрече с препятствием, что определяет влияние высоты микронеровностей поверхности поля и параметров установки штанги на характеристики колебаний штанги и равномерность распределения рабочей жидкости.

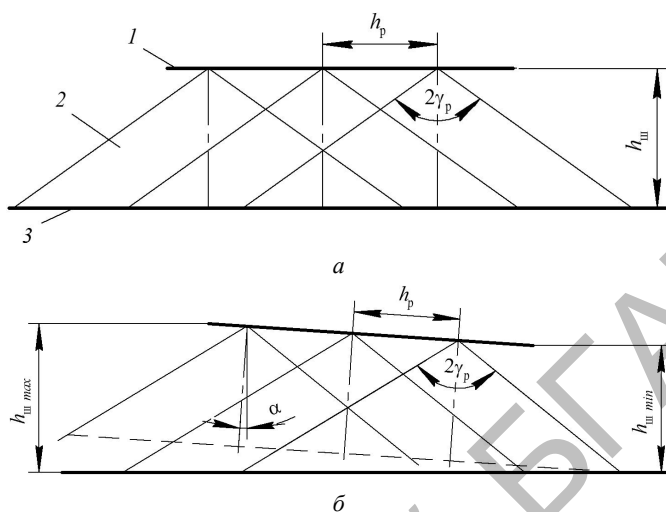


Рис. 5.5. Схемы установки штанги параллельно (а) и под углом α (б) к принимающей поверхности:

$2\gamma_p$ – угол при вершине факела распыла; $h_{\text{ш min}}$, $h_{\text{ш max}}$ – соответственно, наименьшее и наибольшее расстояние между краем штанги и приемной поверхностью; 1 – штанга; 2 – факел распыла; 3 – принимающая поверхность

Влияние высоты установки штанги, амплитуды и частоты колебаний, начальной скорости отклонения края штанги на равномерность распределения жидкости может осуществляться при помощи стационарной лабораторной установки (рис. 5.6). Штанга 2 центральной частью на упоре 1 шарнирно навешивается с возможностью изменения угла наклона в вертикальной плоскости. Второй ее край при помощи шарнира 3 закреплен в направляющей кронштейна 4. Кронштейн 4 закреплен при помощи оси 5 в пазу диска 7. При этом ось 5 может независимо перемещаться в направляющей кронштейна 4 (регулируется амплитуда колебаний) и пазу диска 7 (изменяется величина линейной скорости края штанги). Диск 7 при помощи приводной станции, состоящей из блоков 6, 9 и передачи 8, приводится во вращательное движение электродвигателем. Приводная станция установлена на подставке 10. В нижней части установки установлена принимающая поверхность 11 с мерными сосудами или поверхность с улавливающим капли жидкости материалом.

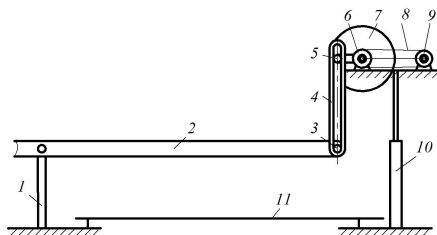


Рис. 5.6. Схема лабораторной установки исследования

В данной установке вместо приводной станции может быть установлен электродвигатель с регулируемой частотой вращения, позволяющий изменять скорость колебаний края штанги за счет изменения угловой частоты вращения диска 7.

Однако данная установка не может быть использована для исследований эффективности подвески и системы стабилизации штанги, а также влияния скорости движения агрегата на параметры колебаний штанги. Данные исследования могут быть проведены только в реальных условиях. Для этих целей используется полигон с выровненной поверхностью. По ширине колеи агрегата укладывается испытательный трек, состоящий из деревянных прямоугольных брусков (рис. 5.7).

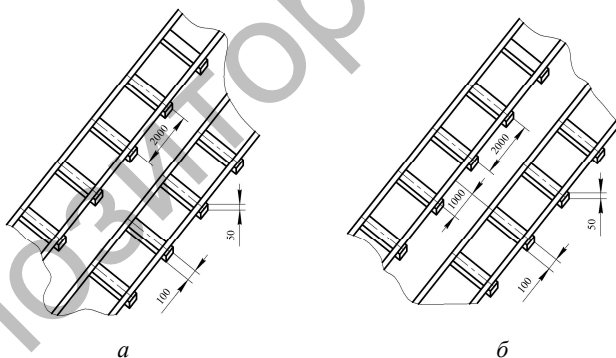


Рис. 5.7. Схема испытательного трека с соосными (а) и со смещенными (б) неровностями

В работе [13] отмечено, что для испытания подвесок штанговых опрыскивателей необходимы экстремальные условия, и обоснован выбор параметров трека: высота брусков 0,05 м и ширина брусков 0,10 м, шаг их установки 2 м. Выбор данных параметров искусственных неровностей определяется среднеквадратичным отклонением

высоты неровностей микропрофиля стерни пшеницы поперек борозд от вспашки и посева: 26...35 мм [13]. Эти же значения для свежевспаханного поля поперек борозд по колее трактора: 24...28 мм и 41 мм [13]. Математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение высоты неровностей микропрофиля поля кормовой свеклы после уборки вдоль борозд имеют значения, соответственно, 45...66 и 33...59 мм, того же поля поперек борозд – 40...50 и 23...32 мм, стерни клевера вдоль борозд – 33...43 и 23...35 и поперек борозд – 54...66 и 40...54 мм [13]. Среднеквадратичные значения высот неровностей разбитых автомобильных дорог, измеряемых от базовой линии, проходящей по поверхности дороги, – 40...50 мм, а подавляющее их количество имеет длину 0,8...3,0 м [13].

Математические ожидания и среднее квадратичные отклонения микропрофиля следа прохода заполненного водой опрыскивателя ПАМ-3000 в агрегате с МТЗ-82 имели следующие значения: для пастбища – 54,1 и 9,4 мм, для вспаханного поля в направлении пахоты – 61,6 и 22,2 мм и в поперечном направлении – 78,9 и 31,1 мм [13].

Исследователи пользуются искусственными неровностями различной высоты: 180, 70, 60 и 50 мм [13]. При испытании подвески автомобиля искусственные неровности размещаются с шагом 2 м [13].

Для определения степени влияния колебаний штанги с используемой подвеской и системой стабилизации на равномерность распределения жидкости на ровную поверхность слева и справа от испытательного трека устанавливаются улавливающие капли поверхности: пропитанная специальным раствором бумага либо улавливающие плиты [13]. При проезде агрегата по треку его колеса копируют искусственные неровности и приводят штангу через узлы опрыскивателя к колебаниям. Капли рабочей жидкости вылетают из распылителей и осаждаются на принимающих поверхностях. По их разбросу судят о влиянии колебаний штанги на равномерность распределения рабочей жидкости. Следует отметить, что необходимым условием проведения исследований являются отсутствие ветра, низкая влажность и оптимальная температура воздуха.

Для определения начальных условий и параметров колебаний штанги на ее краях устанавливаются датчики для измерения характеристик их движения: ускорений (скоростей) в трех направлениях, высоты отклонения и др.

При проезде агрегата по треку его колеса копируют искусственные неровности и приводят штангу через узлы опрыскивателя к колебаниям. Капли рабочей жидкости вылетают из распылителей и осаждаются

на принимающих поверхностях. По их разбросу судят о влиянии колебаний штанги на равномерность распределения рабочей жидкости. При этом следует отметить, что важным условием проведения исследований является наличие благоприятных условий: отсутствие ветра, низкая влажность и оптимальная температура воздуха.

Для определения начальных условий и параметров колебаний штанги на ее краях устанавливаются датчики для измерения характеристик их движения: ускорений (скоростей) в трех направлениях, высоты отклонения и др.

5.2. Выбор целевых функций для оценки эффективности подвесок и систем стабилизации штанги

Для оценки эффективности подвесок и системы стабилизации штанги проводят анализ частотно-амплитудных графических зависимостей, полученных в результате считывания данных с датчиков, установленных на штанге и центре ее подвески. Для анализа используют следующие целевые функции.

Оценочным показателем подвески является коэффициент виброизоляции (коэффициент амортизации) – отношение максимальных средних квадратических значений ускорений конца штанги (как защищаемого–изолируемого объекта) к тем же значениям рамы. Коэффициенты виброизоляции определяются в продольно-вертикальной, поперечно-вертикальной и горизонтальной плоскостях движения агрегата.

Максимальные значения средних квадратических ускорений хорошо характеризуют плавность хода, в связи с чем используются в качестве оценочного показателя плавности хода мобильных машин [13]. Также для анализа используются максимальные средние квадратические значения ускорений в третьоктавных полосах на частотах от 2,0 до 31,5 Гц. Максимальные значения ускорений характеризуют динамику штанги или рамы, а коэффициент виброизоляции характеризует только саму навеску [13, 38].

Также для анализа эффективности работы подвески и системы стабилизации штанги определяют: амплитуду колебаний крайней точки штанги или наибольший угол отклонения штанги от положения устойчивого равновесия в продольно-вертикальной или горизонтальной плоскостях, или наибольшее отклонение в поперечном

направлении. Кроме того, определяют время гашения колебаний, которое должно стремиться к нулю.

При определении степени влияния колебаний штанги на неравномерность распределения рабочей жидкости определяют объем жидкости, вынесенный за пределы участка, который мог быть обработан при расположении штанги параллельно обрабатываемой поверхности.

Также следует отметить, что эффективность модернизации является многосторонней и включает не только качественную, но и экономическую стороны. То есть она должна осуществляться в разумных с экономической точки зрения пределах.

Исходя из вышесказанного, обоснование конструктивных и технологических параметров элементов систем стабилизации штанги следует проводить с учетом агротехнических требований, требований надежности конструкции с учетом технико-экономических показателей модернизации конструкции опрыскивателя. То есть должны учитываться: во-первых, нормативы агротехнических требований, во-вторых, – затраты на модернизацию (технические решения) и, в-третьих, – технологический эффект от внедрения технических решений.

Затраты на технические решения можно представить в виде суммы дополнительных инвестиций для реализации технических решений ΔK и дополнительных эксплуатационных затрат, вызванных усложнением конструкции машины ΔU_3 . Данные затраты должны быть компенсированы технологическим эффектом, полученным в материальном выражении от внедрения технических решений T_3 . Эффект от внедрения технических решений включает в себя агротехнические требования, конструктивные ограничения и др.

Для удобства расчетов следует принять вышеуказанные показатели удельными, то есть отнесенными к объему работ (га).

Тогда получим следующее выражение для целевой функции, позволяющей определить эффективность конструктивных и технологических параметров элементов систем стабилизации штанги:

$$\Phi_m = \Theta_{тр} - \Delta K - \Delta U_3 \rightarrow \max .$$

Очевидно, что при этом в качестве критерия оптимизации будет принят максимум целевой функции.

6. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эффективность использования средств химизации зависит от сроков обработки, равномерности распределения препарата по объекту обработки, его нормы внесения и экологической безопасности. Все это предъявляет жесткие требования к конструкциям широкозахватных сельскохозяйственных опрыскивателей, которые должны обеспечивать качественную обработку сельскохозяйственных культур при минимальных потерях и расходе пестицидов.

Качественная стабилизация штанги является одним из основных условий эффективной и правильной работы опрыскивателя, а также используемых систем автоматизированного управления штангой и связано с установкой датчиков положения на распределительной штанге.

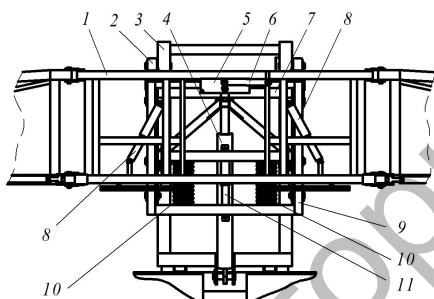
В результате проведенных исследований [106–119] были разработаны конструкции опрыскивателей «Мекосан-2500-18», «Мекосан-2500-18П», «Мекосан-2500-24П» (производитель – ОАО «Мекосан», г. Иваново, Брестская область) и ОШ-2300-18, ОШ-2300-24 (производитель – ОАО «Дятловская сельхозтехника», п. Мировщина, Дятловский район, Гродненская область).

Штанга опрыскивателя «Мекосан-2500-18» навешена на шток гидроцилиндра по принципу маятниковой подвески (рис. 6.1). При этом гашение колебаний осуществляется в вертикальной плоскости при помощи амортизаторов, а в горизонтальной – шарнирно-рычажным механизмом с упругими элементами.

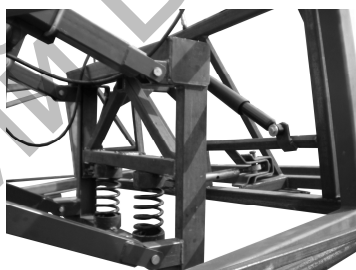


Рис. 6.1. Опрыскиватель «Мекосан-2500-18»

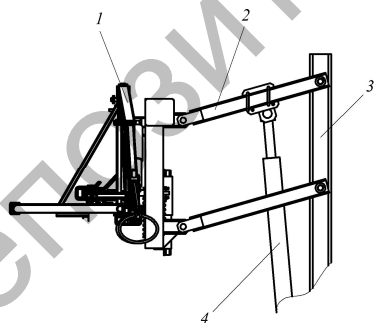
Штанга 1 (рис. 6.2, а, б) опрыскивателей «Мекосан-200-18П» и «Мекосан-2500-24П» навешена на подвижную рамку 7, которая может совершать поступательное движение в направляющих рамки 9. При этом подвижная рамка 7 опирается нижней поверхностью на две цилиндрические пружины, которые установлены на верхней поверхности нижней балки рамки 9. Угол наклона штанги 1 изменяется при помощи кронштейна 5 и рычага 6. Вертикальные колебания подвижной рамки 7, следовательно, и подвески штанги гасятся при помощи вертикальных пружин 10, колебания которых компенсирует амортизатор 11. Колебания штанги гасятся амортизаторами 8. Рамка 9 навешена на раму 3 опрыскивателя при помощи параллелограммного механизма 2 (рис. 6.2, в, г). Высота установки штанги регулируется гидроцилиндром 4.



а



б



в



г

Рис. 6.2. Схема подвески штанги опрыскивателей «Мекосан-2500-18П» (а, б) и «Мекосан-2500-24П» (в, г) с системой стабилизации и механизмом изменения угла ее наклона к горизонтальной поверхности

Опрыскиватели «Мекосан-2500-18» (рис. 6.3), «Мекосан-2500-18П» (рис. 6.4, *а, б*) и «Мекосан-2500-24П» (рис. 6.5, *а, б*) успешно прошли все стадии производственных и приемочных испытаний и освоены в производстве. На 01.04.2018 года выпущено и реализовано 285 опрыскивателей.



а



б

Рис. 6.3. Опрыскиватель «Мекосан-2500-18» в транспортном (*а*) и рабочем (*б*) положениях



а



б

Рис. 6.4. Опрыскиватель «Мекосан-2500-18П» в транспортном (*а*) и рабочем (*б*) положениях



а



б

Рис. 6.5. Опрыскиватель «Мекосан-2500-24П» в транспортном (*а*) и рабочем (*б*) положениях

Штанга 5 (рис. 6.6, *а, б*) опрыскивателей ОШ-2500-18, ОШ-2500-24 навешена на подвижную рамку 2, которая может совершать поступательное движение в направляющих рамки 1. При этом подвижная рамка закреплена на штоке гидроцилиндра 3, нижний шарнир которого установлен на горизонтальной пластине 12. Горизонтальная пластина 12 опирается нижней поверхностью на две цилиндрические пружины 13, которые установлены на верхней поверхности нижней балки рамы 1. Пружины 13 гасят вертикальные колебания подвижной рамки 2 и подвески штанги при одновременном наезде на препятствие колес опрыскивателя, а установленные симметрично между штангой и подвижной рамкой амортизаторы 5 гасят колебания штанги. Для гашения упругих колебаний пружин 13 используются фрикционные материалы в сопряжении «подвижная рамка–рама». Для гашения колебаний штанги в горизонтальной плоскости используется шарнирно-рычажный механизм с упругими элементами.

Данные опрыскиватели выпускаются с тремя видами исполнительных механизмов изменения угла наклона штанги: 1) механический с ручным приводом; 2) механический с электрическим приводом (рис. 6.6); гидравлический (рис. 6.7). Во втором случае угол наклона изменяется при помощи электрического механизма 8 с винтовым механизмом 9, кронштейна 10 и рычага 11 (рис. 6.6). В третьем случае для изменения угла наклона штанги 4 используются кронштейн 10, рычаги 11, 14 и гидроцилиндр 15 (рис. 6.7).

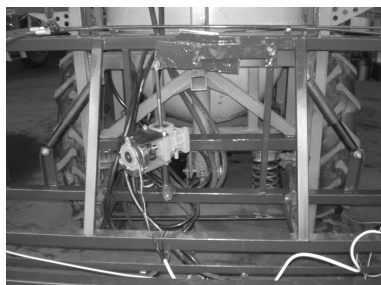
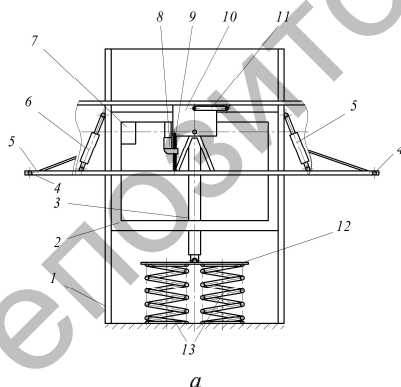


Рис. 6.6. Схема подвески штанги опрыскивателя ОШ-2300-18 с системой стабилизации, системой изменения угла наклона штанги с исполнительным механизмом электрического действия и элементами СМАР:
а – принципиальная схема; *б* – внешний вид

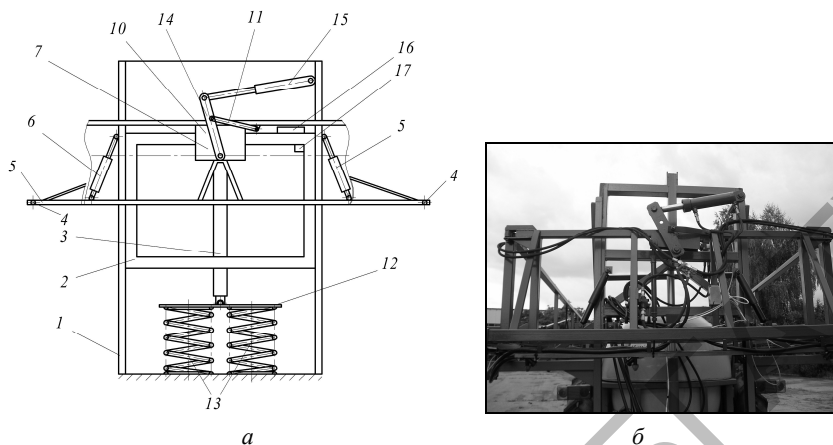
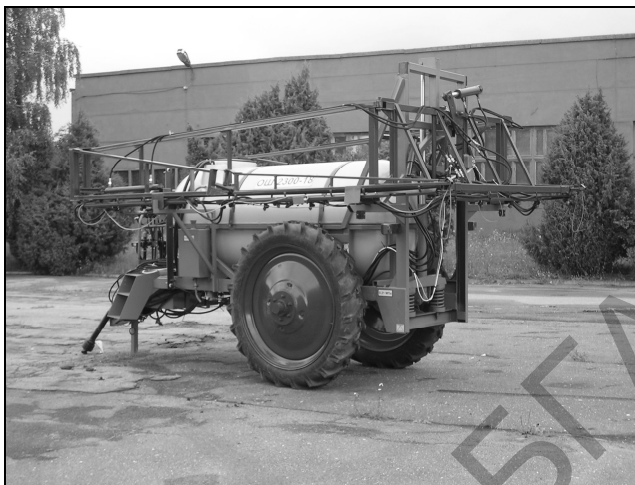


Рис. 6.7. Схема подвески штанги опрыскивателя ОШ-2300-18 с системой табилизации, системой изменения угла наклона штанги с исполнительным механизмом гидравлического действия и элементами СМАР: а – принципиальная схема; б – внешний вид

С механизмами изменения угла наклона электрического и гидравлического действий устанавливается система микропроцессорного автоматизированного регулирования распределительной штанги опрыскивателя СМАР-1. Ее элементами являются (в зависимости от конструкции): при электрическом приводе – блок управления 7, датчики 4, пульт управления (не показан); при гидравлическом приводе (рис. 6.7) – электромагнитный блок управления гидроцилиндром 16, блок управления 17, датчики 4, пульт управления (не показан).



Рис. 6.8. Опрыскиватель ОШ-2300-18 в транспортном (а) и рабочем (б) положениях



*Рис. 6.9. Штанговый опрыскиватель ОШ-2300-18
с установленной СМАР-1 (в транспортном положении)*

Опрыскиватели ОШ-2300-18 (рис. 6.8, 6.9) и ОШ-2300-24 успешно прошли все виды испытаний и освоены в производстве. На 01.04.2018 выпущено и реализовано 128 единиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии обобщен материал по способам и техническому обеспечению внесения рабочих растворов пестицидов в растениеводстве, особое внимание уделено опрыскиванию.

Обоснованы причины снижения эффективности химической защиты растений и предложены направления их устранения.

Приведен анализ конструкций штанговых рабочих органов полевых опрыскивателей, схем их навешивания и систем обеспечения постоянства расстояния между распылителями и обрабатываемой в процессе работы поверхностью.

Исследованы закономерности движения капель рабочих растворов пестицидов в факеле распыла при равновесном положении штанги и ее колебаниях.

Рассмотрены возможности использования различных математических моделей для описания колебательного процесса штанги полевого опрыскивателя.

Исследованы закономерности изменения параметров колебаний штанги в вертикальной и горизонтальной плоскостях в зависимости от конструкции штанги, схемы ее навешивания, характеристик и параметров установки упругих и демпфирующих элементов.

В результате теоретических исследований обоснованы конструкции подвесок штанг, систем их стабилизации и изменения угла наклона относительно обрабатываемой поверхности.

Обоснованы технологические требования, параметры работы и разработана система микропроцессорного автоматизированного регулирования положения штанги (СМАР-1).

Полученные в работе результаты были использованы в конструкциях опрыскивателей «Мекосан-2500-18», «Мекосан-2500-18П», «Мекосан-2500-24П», ОШ-2300-18 и ОШ-2300-24.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интегрированные системы защиты сельскохозяйственных культур от вредителей, болезней и сорняков: рекомендации / Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Ин-т защиты растений НАН Беларуси ; под ред. С. В. Сороки. – Минск : Бел. навука, 2005. – 462 с.
2. Клочков, А. В. Механизация химической защиты растений : монография / А. В. Кочков [и др.]. – Горки : БГСХА. – 2008. – 228 с.
3. Защита растений в устойчивых системах землепользования : в 4 кн. / под общ. ред. Д. Шпаара. – Минск : Орех, 2004. – Кн. 4. – 374 с.
4. Крук, И. С. Способы и технические средства защиты факела распыла от прямого воздействия ветра в конструкциях полевых опрыскивателей / И. С. Крук, Т. П. Кот, О. В. Гордеенко. – Минск : БГАТУ, 2015. – 284 с.
5. Гордеенко, О. В. Повышение эффективности ухода за посевами овощных культур на гребнях совершенствованием оборудования для ленточного внесения гербицидов: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / О. В. Гордеенко. – Горки, 2004. – 169 с.
6. Кот, Т. П. Повышение эффективности обработки вегетирующих культур обоснованием параметров воздухораспределительной и гидравлической систем штанговых опрыскивателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Т. П. Кот. – Минск, 2006. – 152 с.
7. Крук, И. С. Повышение эффективности химической защиты посадок картофеля от сорняков усовершенствованием культиватора-опрыскивателя: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / И. С. Крук. – Минск, 2001. – 200 с.
8. Бешанов, А. В. Гербициды в интенсивном овощеводстве / А. В. Бешанов. – М. : Агропромиздат, 1986. – 248 с.
9. Захаренко, В. А. Гербициды / В. А. Захаренко. – М. : Агропромиздат, 1990. – 240 с.
10. Спиридонов, Ю. Я. Развитие отечественной гербологии на современном этапе/ Ю. Я. Спиридонов, В. Г. Шестаков. – М. : Печатный город, 2013. – 426 с.
11. Справочник по защите растений / В. А. Захарченко [и др.] ; под ред. Ю. Н. Фадеева. – М. : Агропромиздат, 1985. – 415 с.
12. Шамаев, Г. П. Механизация защиты сельскохозяйственных культур от вредителей и болезней / Г. П. Шамаев, С. Д. Шеруда. – М. : Колос, 1978. – 256 с.

13. Вартукаптейнис, К. Э. Обоснование параметров и элементов конструкции штанговых опрыскивателей: дис. ... канд. тех. наук. – Елгава, 1984. – 250 с.

14. Дунский, В. Ф. Оседание аэрозолей / В. Ф. Дунский // Аэрозоли и их применение. – М. : МСХ СССР, 1959. – С. 94–107.

15. Ронкин, В. С. Исследование способов уменьшения потерь пестицидов при опрыскивании полей Белоруссии: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / О. В. Ронкин. – Минск, 1978. – 206 с.

16. Чигарев, Г. А. Снос пестицидов при их применении / Г. А. Чигарев, С. П. Старостин, К. С. Калобина // Бюл. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та защиты растений. – 1974. – № 27. – С. 13–18.

17. Горбач, В. Я. Распределение рабочей жидкости при использовании полевых опрыскивателей / В. Я. Горбач, Н. С. Лепехин // Бюл. ВИЗР. – 1976. – № 35. – С. 23–25.

18. Велецкий, И. Н. Технология применения гербицидов / И. Н. Велецкий. – Л. : Агропромиздат; Ленингр. отд., 1989. – 176 с.

19. Методика оценки технического состояния полевых штанговых опрыскивателей и технологические требования ним / С. К. Карпович, Л. А. Маринич, И. С. Крук [и др.] ; под общ. ред. И. С. Крука. – Минск : БГАТУ, 2016. – 140 с.

20. Борьба с сорняками при возделывании сельскохозяйственных культур / под ред. Г. С. Груздева. – М. : Агропромиздат, 1988. – 228 с.

21. Механизация защиты растений: справочник / И. Н. Велецкий [и др.]. – М. : Агропромиздат, 1992. – 223 с.

22. Дубов, А. С. Турбулентность в растительном покрове / А. С. Дубов, Л. П. Быкова, С. В. Маруниг. – Л. : Гидрометеоздат, 1978. – 202 с.

23. Родионов, С. И. Сельскохозяйственной авиации 75 лет / С. И. Родионов, В. В. Белозеров // Защита и карантин растений. – 2000. – № 5. – С. 15–17.

24. Вялых, В. А. Рекомендации по применению наземного и авиационного опрыскивания при возделывании сельскохозяйственных культур / В. А. Вялых. – Воронеж : Истоки, 2004. – 68 с.

25. Никитин, Н. В. Научно-практические аспекты технологии применения современных гербицидов в растениеводстве / Н. В. Никитин, Ю. Я. Спиридонов, В. Г. Шестаков ; под общ. ред. Ю. Я. Спиридонова, В. Г. Шестакова. – М. : Печатный город, 2010. – 200 с.

26. ООО «Виктория» [Электронный ресурс]. – Ростов н/Д, 2014.
– URL: <http://www.raspyl.narod.ru/avia.htm>. – Дата обращения:
01.04.2015.

27. Пайкин, Д. М. Авиационно-химическая защита растений от вредителей и болезней / Д. М. Пайкин, С. Г. Старостин. – Л. : Отд. изд-ва «Колос», 1965. – 192 с.

28. Сельскохозяйственная авиация: Защита растений и внесение удобрений / под общ. ред. Б. И. Рукавишникова. – М. : Колос, 1967. – 439 с.

29. Сорока, С. В. Перспективы применения сверхмалой авиации для защиты сельскохозяйственных растений в Беларуси / С. В. Сорока, А. Ф. Скурьят, В. М. Атаманенко // Земляробства і ахова раслін. – 2006. – № 6 (49). – С. 14–16.

30. Состояние и перспектива использования сельскохозяйственной авиации для защиты растений от вредителей, болезней и сорняков в Беларуси / С. В. Сорока, А. Ф. Скурьят, В. А. Шантыр // Защита растений: сб. науч. тр. / Ин-т защиты растений НАН Беларуси. – Минск, 2009. – Вып. 33. – С. 429–444.

31. Справочник агронома по защите растений / сост.: А. Ф. Ченкин, В. А. Захаренко. – 3-е изд., доп. и перераб. – М. : Россельхозиздат, 1979. – 352 с.

32. Степук, Л. Я. Авиационное и наземное опрыскивание, экологические и экономические аспекты / Л. Я. Степук // Наше сельское хозяйство. – 2009. – № 3. – С. 58–60.

33. Степук, Л. Я. Экологические и экономические аспекты использования сельскохозяйственной авиации в условиях Республики Беларусь / Л. Я. Степук // Земляробства і ахова раслін. – 2009. – № 5. – С. 45–48.

34. Бердыш, Ю. И. Экологизация защитных мероприятий от вредителей, болезней и сорняков в Краснодарском крае / Ю. И. Бердыш // Химический метод защиты растений. Состояние и перспективы повышения экологической безопасности: матер. Междунар. науч.-практ. конф., Инновац. центр защиты растений, 6–10 дек. 2004 г. / Инновац. центр защиты растений ; ред. колл.: В. А. Павлюшина [и др.]. – СПб., 2004. – С. 19–22.

35. Нагорский, И. С. Механизация процессов химизации и экология / И. С. Нагорский, Л. Я. Степук, В. П. Дмитрачков. – Минск : Ураджай, 1993. – 272 с.

36. Сельскохозяйственные машины (основные тенденции развития тракторных опрыскивателей) / В. В. Ченцов. – М. : ЦНИИТЭИ Тракторное и с.-х. машиностроение, 1984. – Вып. 12. – 58 с.

37. Дерягин, Б. В. Смачивающие пленки / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев. – М. : Наука, 1984. – 160 с.

38. Вікович, І. А. Конструкції і динаміка штангових обприскувачів : монографія / І. А. Вікович. – Львів : Видавн. Нац. універс. «Львівська політехніка», 2003. – 460 с.

39. Корсунов, Ю. А. Экспериментальное исследование дробления капель жидкости при низких значениях числа Рейнольдса / Ю. А. Корсунов, А. В. Тишин // Изв. Акад. наук СССР. Механика жидкости и газа. – 1971. – № 2. – С. 128–138.

40. Пінний маркер / Науково-Виробниче Підприємство «АГРОПОСТАЧ». – URL: <https://agropostach.prom.ua>. – Дата обращения: 12.02.2018.

41. Ротенберг, Ю. Ю. Влияние скорости движения на качество опрыскивания / Ю. Ю. Ротенберг, Т. В. Раскатова, И. А. Редкозубов // Защита и карантин растений. – 2011. – № 6. – С. 37–38.

42. Аэрозоли в сельском хозяйстве: сб. ст. / ВАСХНИЛ ; под ред. Ю. Н. Фадеева. – М. : Колос, 1973. – 242 с.

43. Kruk, I. S. Methodological approaches to the justification of the kinematic parameters of the volumetric sprayers // I. S Kruk [et al.] // Inzynieria Rolnicza. – 2015. – № 3 (155). – P. 37–46.

44. Снижение потерь пестицидов из-за сноса при проведении обработок в неблагоприятных погодных условиях / И. С. Крук [и др.] // Экология и сельскохозяйственная техника : матер. 6-й Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 13–14 мая 2009 г.: в 2 т. / СПб., ГНУ СЗНИИМЭСХ Россельхозакадемии; ред. колл.: В. Н. Афанасьев [и др.]. – СПб, 2009. – Т. 2: Экологические аспекты производства продукции растениеводства, мобильной энергетики и сельскохозяйственных машин. – С. 50–57.

45. Способы и устройства защиты факела распыла при внесении пестицидов в ветреную погоду / И. С. Крук [и др.] // Механизация и электрификация: Межведом. тематический сб. / НПЦ НАН Беларуси по механиз. сел. хоз-ва / ред. колл.: В.Н. Дашков [и др.]. – Минск, 2007. – С. 106–113.

46. Болвонович, В. Берем потери пестицидов под контроль / В. Болвонович, Э. Могилевский // Белорусское сельское хозяйство. – 2013. – № 5 (133). – С. 12–14.

47. Ротенберг, Ю. Ю. Высота штанги полевого опрыскивателя / Ю. Ю. Ротенберг, Т. В. Раскатова, И. А. Редкозубов // Защита и карантин растений. – 2011. – № 5. – С. 42–43.

48. Amazone. – URL: <https://www.amazone.ru>. – Дата обращения: 16.02.2018.

49. Ground Following system / AG SHIELD. – URL: <http://www.agshield.com>. – Дата обращения: 16.02.2018.

50. Петровская, Е. В. Повышение равномерности распределения рабочей жидкости штангового опрыскивателя: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Е. В. Петровская. – Челябинск, 2006. – 195 с.

51. Lemken. – URL: <https://www.lemken.ru>. – Дата обращения: 16.02.2018.

52. Крук, И. С. Повышение эффективности химической защиты овощных культур усовершенствованием навески и стабилизации штанги сельскохозяйственного опрыскивателя / И. С. Крук, А. И. Гайдуковский // Овощеводство: сб. науч. тр. / НАН Беларуси ; РУП «Институт овощеводства». – Минск, 2008. – Т. 15. – С. 215–222.

53. Штанга опрыскивателя: RU 2017419 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 14.01.2018.

54. Кузнецов В. В. Методика оценки свойств опрыскивающего агрегата / В. В. Кузнецов, А. В. Кузнецов, Е. В. Кузнецов // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2010. – № 2. – С. 81–84.

55. Подвеска штанги опрыскивателя : SU 1033103 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 11.01.2018.

56. Опрыскиватель: SU 912125 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 11.01.2018.

57. Підвіска колісного одновісного причепа : UA 36664 / База патентів України. – URL: <https://www.uapatents.com>. – Дата обращения: 16.01.2018.

58. Підвіска обприскувача : UA 66880 / База патентів України. – URL: <https://www.uapatents.com>. – Дата обращения: 16.01.2018.

59. Подвеска штанги опрыскивателя : RU 2650530 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 11.01.2018.

60. Опрыскыватель прицепной штанговой : RU 2160534 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 11.01.2018.

61. Штанговой опрыскыватель : SU 1147315 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 11.01.2018.

62. Штанга обприскувача з динамічним гасником коливань : UA 18721 / База патентів України. – URL: <https://www.uapatents.com>. – Дата обращения: 17.03.2018.

63. Штанги обприскувача : UA 75664 / База патентів України. – URL: <https://www.uapatents.com>. – Дата обращения: 17.03.2018.

64. Штанги обприскувача : UA 77241 / База патентів України. – URL: <https://www.uapatents.com>. – Дата обращения: 17.03.2018.

65. Механізм навіски штанги обприскувача : UA 55280 / База патентів України. – URL: <https://www.uapatents.com>. – Дата обращения: 17.03.2018.

66. Штанга опрыскывателя : SU 940719 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 16.01.2018.

67. Штанги опрыскывателя : RU 2540113 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 16.01.2018.

68. Підвіска штанги обприскувача : UA 11792 / База патентів України. – URL: <https://www.uapatents.com>. – Дата обращения: 17.03.2018.

69. Штанга к опрыскывателю : SU 1106464 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 16.01.2018.

70. Штанга штангового опрыскывателя : RU 2220573 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 16.01.2018.

71. Механізм навішення штанги обприскувача : UA 49100 / База патентів України. – URL: <https://www.uapatents.com>. – Дата обращения: 17.03.2018.

72. Схема управления штангой опрыскывателя : SU 1794430 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 16.01.2018.

73. Опрыскиватель : SU 180921 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 14.01.2018.

74. Механизм подвески распределительной штанги: SU 2327327 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 14.01.2018.

75. Подвеска штанги опрыскивателя : SU 2594973 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 14.01.2018.

76. Подвеска штанги опрыскивателя : RU 2650530 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 14.01.2018.

77. Підвіска штанги обприскувача : UA 61629 / База патентів України. – URL: <https://www.uapatents.com>. – Дата обращения: 17.03.2018.

78. Підвіска штанги обприскувача : UA 56758 / База патентів України. – URL: <https://www.uapatents.com>. – Дата обращения: 17.03.2018.

79. Підвіска штанги обприскувача : UA 57396 / База патентів України. – URL: <https://www.uapatents.com>. – Дата обращения: 17.03.2018.

80. Штанга малогабаритного обприскувача : UA 55199 / База патентів України. – URL: <https://www.uapatents.com>. – Дата обращения: 26.03.2018.

81. Рама причіпного вентиляторного обприскувача : UA 48663 / База патентів України. – URL: <https://www.uapatents.com>. – Дата обращения: 26.03.2018.

82. Підвіска штанги обприскувача : UA 11766 / База патентів України. – URL: <https://www.uapatents.com>. – Дата обращения: 26.03.2018.

83. Подвеска штанги опрыскивателя : SU 1085579 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL : <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 14.01.2018.

84. Штанговый опрыскиватель: SU 1611307 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 14.01.2018.

85. Штанговый опрыскиватель: SU 1147315 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 14.01.2018.

86. Подвеска штанги опрыскивателя : SU 1500230 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 14.01.2018.

87. Штанговый опрыскиватель : SU 1001905 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 14.01.2018.

88. Штанга опрыскивателя: RU 2017419 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 14.01.2018.

89. Подвеска штанги опрыскивателя : SU 1113070 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 14.01.2018.

90. Hardi. The spraytr. – URL: <http://old.hardi-international.com>. – Дата обращения: 16.11.2018.

91. Пановко, Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я. Г. Пановко. – Л. : Машиностроение, 1976. – 370 с.

92. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механических колебаний : учебное пособие / Я. Г. Пановко. – М. : Наука, 1980. – 272 с.

93. Тарг, С. М. Курс теоретической механики : учебник для втузов / С. М. Тарг. – М. : Высш. шк., 1986. – 416 с.

94. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уивер ; пер. с англ. Л. С. Корнейчука ; под ред. Э. И. Григолюка. – М. : Машиностроение, 1985. – 472 с.

95. Яблонский, А. А., Сигизмуд С.Н. Курс теории колебаний / А. А. Яблонский, С. Н. Сигизмуд. – М. : Высш. школа, 1966. – 256 с.

96. Озолс, Я. Г. Оценка подвесок штанг опрыскивателей, применяемых в Латвийской ССР / Я. Г. Озолс [и др.] // Динамика и надежность сельскохозяйственных машин : тр. ЛСХА. – Елгава, 1982. – Вып. 202. – С. 3–7.

97. Рыбак, Т. И. Методы оценки несущей способности и долговечности машин для химической защиты в растениеводстве / Т. И. Рыбак. – Киев : Наукова думка, 1985. – 232 с.

98. Кузнецов, В. В. Обоснование способа гашения энергии колебаний штанги полевого опрыскивателя / В. В. Кузнецов // Сб. научных трудов института энергетики и природопользования. – Брянск, 2017. – С. 93–100.

99. Кузнецов В. В. Разработка гасителя колебаний экспериментальной штанги полевого опрыскивателя / В. В. Кузнецов //

Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2016. – № 1 (15). – С. 105–109.

100. Вікович, І. А. Вплив коливань штанги на рівномірність обприскування / І. А. Вікович // Вісн. Держ. ун-ту «Львівська політехніка». – Львів, 1999. – № 376. – С. 11–14.

101. Вікович, І. А. Розрахунок маятно-пружинної системи віброзахисту великогабаритних навісних елементів колісних машин / І. А. Вікович, Б. М. Дівесв // Вісн. Держ. ун-ту «Львівська політехніка». – Львів, 1999. – № 371. – С. 86–92.

102. Викович, И. А. Колебания простой маятниковой штанги опрыскивателя при кинематическом возбуждении / И. А. Викович // Весн. Львов. политехн. ин-та. – Львов, 1988. – № 220. – С. 12–15.

103. Кошляков, В. П. Основные дифференциальные уравнения математической физики / В. П. Кошляков. – М. : Наука, 1936. – 505 с.

104. Ворович, И. И. О методе Бубнова–Галеркина в нелинейной теории колебания пологих оболочек / И. И. Ворович // Доклады АН СССР, 1956. – Т. 110. – № 5. – С. 723–726.

105. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 984 с.

106. Опрыскиватель прицепной штанговый: пат. 20400 Респ. Беларусь, МПК А 01М 7/00 / И. С. Крук, В. А. Агейчик, П. С. Корженевич; заявитель Беларус. гос. аграр. техн. ун-т. – № а 20121842; заявл. 27.12.2012; опубл. 30.08.2016 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2016. – № 4. – С. 83–84.

107. Опрыскиватель прицепной штанговый: пат. 20670 Респ. Беларусь, МПК А 01М 7/00 / И. С. Крук, В. А. Агейчик, П. С. Корженевич; заявитель Беларус. гос. аграр. техн. ун-т. – № а 20130327; заявл. 15.03.2013; опубл. 30.12.2016 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2016. – № 6. – С. 54.

108. Опрыскиватель прицепной штанговый: пат. 20670 Респ. Беларусь, МПК А 01М 7/00 / И.С. Крук, В. А. Агейчик, П. С. Корженевич; заявитель Беларус. гос. аграр. техн. ун-т. – № а 20130327; заявл. 15.03.2013; опубл. 30.12.2016 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2016. – № 6. – С. 54.

109. Крук, И. С. Использование независимой навески и системы стабилизации штанги в конструкциях сельскохозяйственных

опрыскивателей / И. С. Крук, А. И. Гайдуковский // Экология и сельскохозяйственная техника : матер. Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 13–14 мая 2009 г.: в 2 т. – СПб. : СЗНИИМЭСХ, 2009. – Т. 2. – С. 191–197.

110. Крук, И. С. Равномерность внесения средств химизации и механизмы ее обеспечения в конструкциях современных штанговых машин // Актуальные проблемы повышения квалификации и переподготовки кадров агропромышленного комплекса: доклады Междунар. науч.-практ. конференции, Минск, 24–26 ноября 2010 г.: в 2 т. – Минск : БГАТУ. – Т. 2. – С. 63–67.

111. Пути снижения амплитуды колебаний штанги широкозахватного сельскохозяйственного опрыскивателя / И. С. Крук, А. И. Гайдуковский // Инж. вестник. – 2006. – № 2 (22). – С. 41–42.

112. Теоретические исследования колебаний жестко закрепленной на остова опрыскивателя штанги / И. С. Крук, Ю. С. Биза, А. Е. Маркевич // Инж. вестник. – 2007. – № 1 (23). – С. 82–84.

113. Исследование процесса колебаний штанги опрыскивателя в вертикальной плоскости с учетом изгиба ее конструкции / Ю. С. Биза [и др.] // Инж. вестник. – 2007. – № 2 (24). – С. 73–77.

114. Аналитический подход в оценке колебаний штанги опрыскивателя в горизонтальной плоскости / Ю. В. Чигарев, И. С. Крук, А. И. Гайдуковский // Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва / Вісник Харків. нац. тех. універс. сільського господарства імені Петра Василенка. – 2008. – Вып. 69. – С. 312–319.

115. К обоснованию использования амортизаторов для обеспечения плавности хода штанги сельскохозяйственного опрыскивателя / Ю. С. Биза [и др.] // Инж. вестник. – 2010. – № 1 (29). – С. 41–43.

116. Особенности расчета элементов системы стабилизации штанги при одновременном наезде колес опрыскивателя на препятствие / Ю. С. Биза [и др.] // Инж. вестник. – 2008. – № 2 (26). – С. 70–72.

117. Моделирование процесса колебаний штанги с независимой маятниковой навеской и системой стабилизации вертикальной плоскости / И. С. Крук, А. А. Тиунчик, В. Романюк // Весці

Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2018. – № 4. – С. 469–480.

118. Аналітычнае абоснаванне параметраў колебанняў штангі з незалежнай маятніковай навескай і сістэмай стабілізацыі ў вертыкальнай плоскасці / Ю. С. Биза [і др.] // Інж. вестник. – 2008. – № 1 (25). – С. 38–40.

119. Матэматычнае мадэліраванне падзення каплі пестицыда пры хімічнай захіце пасеваў / Ю. С. Биза [і др.] // Агропанорама. – 2013. – № 3 (97). – С. 9–11.

120. Левіч, Б. Г. Фізіка-хімічная гідродынаміка / Б. Г. Левіч. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Физматгиз, 1959. – 699 с.

121. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1955. – 610 с.

122. Кильчевский, Н. А. Курс теоретической механики: в 2 т. / Н. А. Кильчевский. – М. : Наука, 1972. – Т. 1: Кинематика, статика, динамика точки. – 456 с.

123. Лойцянский, Л. Г. Курс теоретической механики: в 2 т. / Л. Г. Лойцянский, А. И. Лурье. – М. : Наука, 1983. – Т. 2: Динамика. – 640 с.

124. Дунский, В. Ф. Оседание грубодисперсного аэрозоля на подстилающую поверхность земли / В. Ф. Дунский [і др.]. – Л. : Гидрометеоздат, 1966. – 235 с.

125. Методика инженерного расчета кинематических параметров движения капель рабочего раствора пестицидов в воздушной среде / О.В. Гордеенко [і др.] // Агропанорама. – 2011. – № 6 (88). – С. 6–10.

126. Пискунов, Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисление для втузов: учебное пособие для втузов / Н. С. Пискунов. – 13-е изд. – М. : Наука, 1985. – 432 с.

127. Лепехин, Н.С. Изучение распределения жидкости по ширине факела распылителей для проведения ленточного опрыскивания / Н. С. Лепехин // Бюл. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та защиты растений. – 1988. – № 74. – С. 36–38.

128. Схема управления штангой опрыскивателя : RU 2175190 / FindPatent.ru. Патентный поиск. – URL: <https://www.findpatent.ru>. – Дата обращения: 11.01.2018.

129. Озолс, Я. Г. Анализ факторов, влияющих на качество работы штанговых опрыскивателей // Исследование динамики штанговых опрыскивателей : тр. ЛСХА. – Егава, 1987. – Вып. 239. – С. 18–19.

130. Подвеска штанги опрыскивателя с пространственной изоляцией / А. А. Дзенис, А. О. Сияниекс // Исследование штанги опрыскивателя с пространственной виброизоляцией // Исследование динамики штанговых опрыскивателей : тр. ЛСХА. – Елгава, 1987. – Вып. 239. – С. 50–57.

131. TeeJet. Каталог 50-RU / TeeJet Technologies. A Subsidiary of Spraying Systems Co. Каталог 50A-RU. – URL: <https://www.teejet.it>. – Дата обращения: 30.07.2016.

Научное издание

Крук Игорь Степанович

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ
ШТАНГОВЫХ ОПРЫСКИВАТЕЛЕЙ**

Ответственный за выпуск *М. А. Прищепов*

Редактор *Т. В. Каркоцкая*

Компьютерная верстка *Е. А. Хмельницкой, Т. В. Каркоцкой*

Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 19.12.2018. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 15,81. Уч.-изд. л. 12, 36. Тираж 100 экз. Заказ 482.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

«Белорусский государственный аграрный технический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/359 от 09.06.2014.

№ 2/151 от 11.06.2014.

Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.