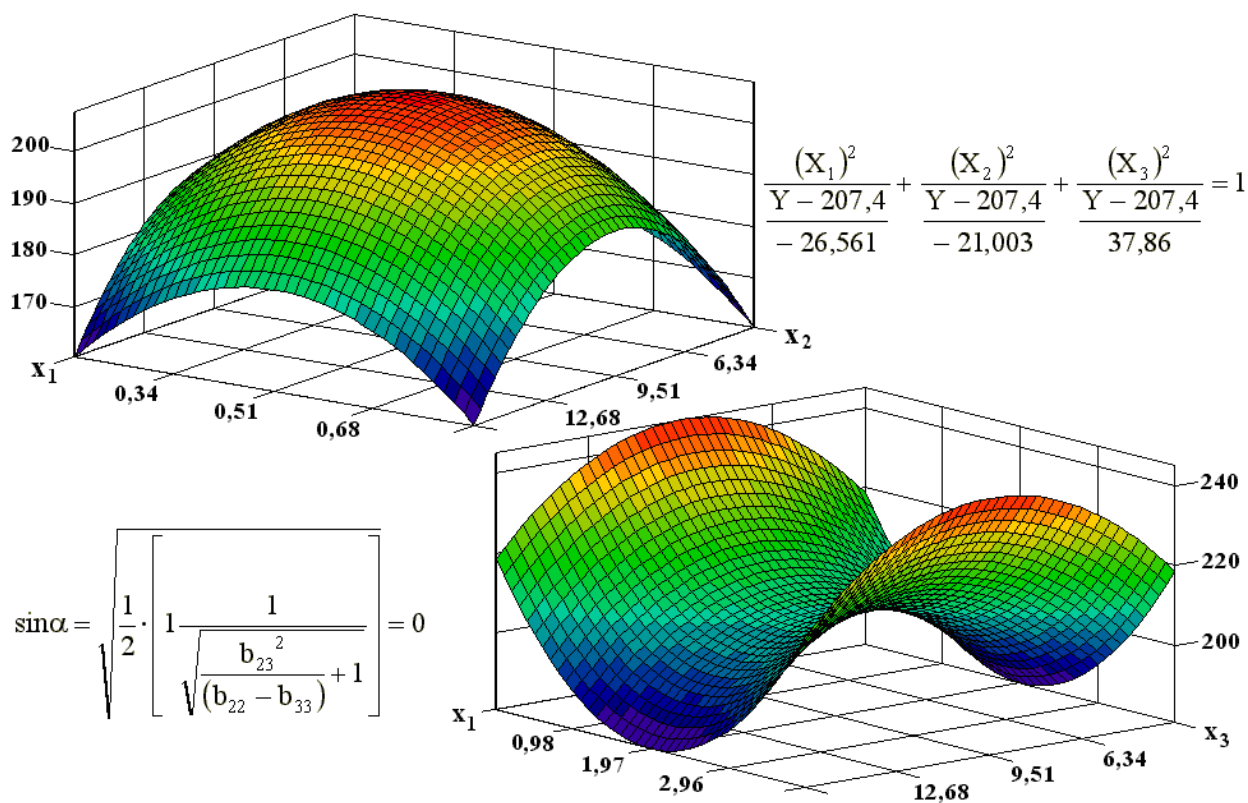


Г.Г. МАСЛОВ  
 Е.И. ТРУБИЛИН  
 В.В. ЦЫБУЛЕВСКИЙ

МОДЕЛИРОВАНИЕ В АГРОИНЖЕНЕРИИ



**Г.Г. МАСЛОВ  
Е.И. ТРУБИЛИН  
В.В. ЦЫБУЛЕВСКИЙ**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ В АГРОИНЖЕНЕРИИ**

**Допущено Министерством сельского хозяйства Российской Федерации в качестве учебного пособия для подготовки магистров высших аграрных учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 35.00.00 «Сельское, лесное и рыбное хозяйство»**

**Краснодар  
КубГАУ  
2019**

УДК 621.7/9.002:519.24

Рецензент  
доктор технических наук, профессор  
В.А. Самсонов

Маслов Г. Г., Трубилин Е. И., Цыбулевский В. В. Моделирование в агроинженерии: Учебн. пособие для сельскохозяйственных ВУЗов. – Краснодар, 2019. – 304с., ил.

В книге представлены вопросы моделирования и статистические методы планирования экспериментов для оптимизации параметров и режимов работы машин при выполнении механизированных производственных процессов при проведении аудиторной и самостоятельной работы.

Последовательно рассмотрены этапы выбора зависимых и не зависимых переменных, факторные планы и планы второго порядка, симметричные композиционные планы различных типов (ортогональные, ротатабельные, типа  $B_k$ ), методика статистической обработки результатов эксперимента.

Подробно дается анализ моделей второго порядка, преобразование уравнений второй степени к каноническому виду и построение различных поверхностей отклика. В книге приводятся примеры программ в среде MathCAD, а также программы и методики экспериментальных исследований.

Предназначено для студентов укрупненных групп направлений подготовки 35.00.00 «Сельское, лесное и рыбное хозяйство», очной и заочной форм обучения.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1. Полный факторный эксперимент, общие принципы построения математических моделей и свойства планов.....	6
2. Критерии оптимальности планов.....	13
3. Проведение эксперимента и статистическая обработка его результатов.....	16
4. Общие представления о планах второго порядка.....	20
5. Симметричные композиционные ортогональные планы.....	21
6. Симметричные композиционные ротатабельные планы.....	25
7. Симметричные композиционные планы типа $V_k$ .....	30
8. Анализ моделей второго порядка.....	33
9 Определение энергоемкости процесса обработки почвы по контуру залегания корневой системы.....	38
9.1 Программы и методики экспериментальных исследований.....	38
9.2 Экспериментальная установка диммометрирования.....	40
9.3 Показатели энергетической оценки и методы их определения.....	42
9.4 Методика обработки экспериментальных данных.....	43
9.5 Выбор критерия оптимальных планов второго порядка и обработкой данных планового эксперимента.....	44
9.6 Частная методика проверки на адекватность аналитической зависимости по критерию Кохрена.....	48
9.7 Результаты экспериментальных исследований.....	50
10 Оптимизация параметров и режимов работы ультрамалообъемного садового опрыскивателя.....	72
10.1 Программа экспериментальных исследований.....	72
10.2 Экспериментальная установка.....	72
10.3 Лабораторная установка для определения качественных показателей распыла жидкости.....	73
10.4 Общая методика экспериментальных исследований.....	76
10.5 Частная методика экспериментальных исследований.....	76
10.6 Методика обработки данных планового эксперимента.....	82
10.7 Результаты экспериментальных исследований.....	86
11 Оптимизация параметров и режима работы приспособления для опрыскивания приствольных зон в садах.....	104
11.1 Программа экспериментальных исследований.....	104
11.2 Экспериментальная установка.....	104
11.3 Общая методика экспериментальных исследований.....	106
11.4 Частная методика экспериментальных исследований.....	107
11.5 Методика изучения агрофона.....	113
11.6 Методика проведения лабораторно-полевого опыта.....	114
11.7 Методика проведения полевого опыта.....	115
11.8 Методика определения физико-математических свойств рабочей жидкости.....	116

11.9 Результаты экспериментальных исследований.....	126
11.11 Оптимизация конструктивных параметров поворотного устройства...	141
12 Оптимизация параметров и режима работы протравливания семян.....	148
12.1 Программа исследований.....	148
12.2 Экспериментальная установка.....	148
12.3 Методика экспериментальных исследований на установке.....	148
12.4 Методика обработки экспериментальных данных.....	158
12.5 Методика планирования двухфакторного эксперимента.....	159
12.6 Результаты экспериментальных исследований.....	162
13. Общая программа и методика экспериментальных исследований.....	181
13.1. Цель и задачи экспериментальных исследований.....	181
13.2. Оборудование и приборы для проведения экспериментальных исследований.....	181
13.3. Методика определения наиболее значимых факторов, влияющих на расслоение смесей при их истечении из бункеров.....	184
13.4. Методика планирования экстремального эксперимента.....	187
13.5. Методика определения зоны максимальной интенсивности расслоения смеси при ее истечении из бункеров.....	190
13.6. Методика экспериментальных исследований эффективности технических средств для снижения расслоения смесей минеральных удобрений.....	192
13.7. Методика обработки экспериментальных данных.....	192
13.8. Анализ результатов исследований.....	194
13.9 Результаты оценки однородности туковых смесей, истекающих из бункера НРУ-0,5 (МВУ-0,5).....	196
13.10 О факторах, влияющих на расслоение смесей при их истечении из бункеров.....	197
13.11 Проверка адекватности модельной и реальной смесей.....	198
13.12 Описание поверхностей откликов функций многофакторного эксперимента.....	199
13.13 Определение зоны максимальной интенсивности расслоения смесей при их истечении из бункеров.....	204
13.14. Проверка эффективности технических средств, снижающих расслоение смесей.....	205
13.15. Выводы по главе.....	211
Литература .....	213
Приложения .....	219

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной техники в сельском хозяйстве связано с созданием новых и постоянным совершенствованием существующих технологических процессов и машин. Основой их разработки и оптимизации является эксперимент. Заметное повышение эффективности экспериментальных исследований и инженерных разработок достигается использованием математических методов планирования экспериментов (моделирование в агроинженерии).

В предлагаемой книге изложены некоторые методы планирования применительно к решению задач в сельскохозяйственном производстве.

Круг задач оптимизации весьма обширен, но, к сожалению, методы планирования используются для их решения явно недостаточно.

Использование математико-статистических методов при постановке задач. В процессе экспериментирования и при обработке полученных данных существенно сокращают сроки решения, снижает затраты на исследования и повышает достоверность полученных результатов.

Данная книга, написанная инженерами для инженеров, отличается от большинства существующих учебных пособий стремлением учесть специфику решения задач в сельскохозяйственном производстве.

В книге рассмотрены далеко не все существующие методы планирования экспериментов, а выбраны лишь те, которые по мнению авторов представляют наибольший интерес для задач обоснования новых рабочих органов, машин и технологий в агроинженерии.

В книгу включены 37 программ, написанные в среде MathCAD.

Также рассмотрены программы и методика экспериментальных исследований на примерах:

1. Определение энергоемкости процесса обработки почвы по контуру залегания корневой системы
2. Оптимизация параметров и режимов работы ультрамалообъемного садового опрыскивателя
3. Оптимизация параметров и режима работы приспособления для опрыскивания приствольных зон в садах
4. Оптимизация параметров и режима работы протравливания семян
5. Общая программа и методика экспериментальных исследований

## 1. Полный факторный эксперимент, общие принципы построения математических моделей и свойства планов

Рассмотрим простейший случай, когда в задаче варьируются только два фактора:  $x_1$  и  $x_2$ , причем каждый на двух уровнях  $+1$  и  $-1$ . Все возможные комбинации факторов будут исчерпаны в следующих четырех опытах, указанных в таблице 1.1. В 1-ом опыте оба фактора находятся на верхнем уровне; во 2-м фактор  $x_1$  - на нижнем, а фактор  $x_2$  - на верхнем и т.д. Такие таблицы обычно называют **матрицами планирования экспериментов**. В общем случае эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называют **полным факторным**. Если число уровней каждого фактора равно двум, то число опытов полного факторного эксперимента  $N$  составляет  $N=2^k$ ; где:  $k$  - число факторов;  $2$  - число уровней [8].

Существует несколько способов построения матриц полного факторного эксперимента. Одни из наиболее простых заключается в следующем: при любом  $k$  необходимо повторить дважды матрицу планирования для случая  $k-1$  сначала при значении  $k$  - го фактора на верхнем уровне, а затем на нижнем. Последовательное достраивание матриц полного факторного эксперимента при увеличении от 2 до 4 показано в таблице 1.2.

Отметим следующие два важных свойства рассмотренных планов. Во-первых, они **симметричны** относительно центра эксперимента

$$\sum_{u=1}^N x_{i_u} = 0, \quad i=1,2,\dots, k; \quad (1.1)$$

т. е. сумма элементов любого столбца матрицы планирования равна нулю. Во-вторых, эти планы **нормированы**:

$$\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 = N, \quad i=1,2,\dots, k; \quad (1.2)$$

т. е. сумма квадратов элементов любого столбца равна числу опытов.

Таблица 1.1. Матрица полного факторного эксперимента  $2^2$

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$y$
1	+1	+1	$y_1$
2	-1	+1	$y_2$
3	+1	-1	$y_3$
4	-1	-1	$y_4$

Таблица 1.2. Матрица полного факторного эксперимента от  $2^2$  до  $2^4$

План	№ опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
$2^2$ $2^3$ $2^4$	1	+	+	+	+
	2	-	+	+	+
	3	+	-	+	+
	4	-	-	+	+
	5	+	+	-	+
	6	-	+	-	+
	7	+	-	-	+
	8	-	-	-	+
	9	+	+	+	-
	10	-	+	+	-
	11	+	-	+	-
	12	-	-	+	-
	13	+	+	-	-
	14	-	+	-	-
	15	+	-	-	-
	16	-	-	-	-

Рассмотрим теперь вид математической модели, которую можно построить после реализации опытов полного факторного эксперимента.

Запишем еще раз матрицу полного факторного эксперимента  $2^2$  в таблицу 1.3.

Таблица 1.3. Расширенная матрица полного факторного эксперимента  $2^2$

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1 x_2$	$y$
1	2	3	4	5	6
1	+1	+1	+1	+1	$y_1$
2	+1	-1	+1	-1	$y_2$
3	+1	+1	-1	-1	$y_3$
4	+1	-1	-1	+1	$y_4$

Здесь планом эксперимента являются, по сути, лишь столбцы 3 и 4. Столбец 6 содержит результаты опытов. Остальные столбцы - вспомогательные [8].

Начнем строить линейную модель:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i, \quad (1.3)$$

или для случая двух факторов:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2, \quad (1.4)$$

Отметим, что любую модель из рассматриваемых можно считать **линейной**.

Рассматриваемые модели, может быть и нелинейные по факторам, но всегда линейные по неизвестным коэффициентам.



Для вычисления коэффициентов модели (1.3) обычно используют метод наименьших квадратов. Полученные с его помощью оценки коэффициентов обладают некоторыми оптимальными в статистическом смысле свойствами: состоятельностью, несмещенностью, эффективностью и достаточностью. Оценка коэффициента состоятельна, если при увеличении объема выборки она приближается к истинному значению коэффициента; несмещенна, если математическое ожидание ее равно оцениваемому значению коэффициента; эффективна, если оценка характеризуется минимальной дисперсией; достаточна - если включает максимум информации о коэффициенте (подробней обо всех этих свойствах см., например, в [10]).

При использовании метода наименьших квадратов минимизируется следующая функция:

$$\Phi = \sum_{u=1}^N (y_u - \hat{y}_u)^2 = \min, \quad (1.5)$$

где  $y_u$  и  $\hat{y}_u$  - соответственно экспериментальные и рассчитанные по уравнению (1.3) значения  $y$  в  $u$ -м опыте;  $N$  — общее число опытов.

Перепишем уравнение (1.4), введя в него фиктивную переменную  $x_0$ , принимающую во всех опытах значение +1 (столбец 2 в таблице 1.3).

$$y = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 \quad (1.6)$$

Тогда (1.5) можно записать как

$$\Phi = \sum_{u=1}^N (y_u - b_0 x_{0u} - b_1 x_{1u} - b_2 x_{2u})^2 = \min \quad (1.7)$$

Минимум функции (1.7) находят приравниванием нулю частных производных:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial b_0} = 0; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial b_1} = 0; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial b_2} = 0.$$

После дифференцирования и простейших преобразований получим так называемую систему нормальных уравнений метода наименьших квадратов:

$$\begin{cases} b_0 \sum_{u=1}^N x_{0u}^2 + b_1 \sum_{u=1}^N x_{0u} x_{1u} + b_2 \sum_{u=1}^N x_{0u} x_{2u} = \sum_{u=1}^N x_{0u} y_u \\ b_0 \sum_{u=1}^N x_{0u} x_{1u} + b_1 \sum_{u=1}^N x_{1u}^2 + b_2 \sum_{u=1}^N x_{1u} x_{2u} = \sum_{u=1}^N x_{1u} y_u, \\ b_0 \sum_{u=1}^N x_{0u} x_{2u} + b_1 \sum_{u=1}^N x_{1u} x_{2u} + b_2 \sum_{u=1}^N x_{2u}^2 = \sum_{u=1}^N x_{2u} y_u \end{cases} \quad (1.8)$$

Решение системы дает оценки неизвестных коэффициентов модели (1.6).

Составим систему (1.8) для случая полного факторного эксперимента, записанного в таблицу 1.3.. Оказывается, что некоторые члены уравнений, входящие в систему, равны, нулю. Действительно, легко видеть, что

$$\sum_{u=1}^N x_{0_u} x_{1_u} = 0; \quad \sum_{u=1}^N x_{0_u} x_{2_u} = 0; \quad \sum_{u=1}^N x_{1_u} x_{2_u} = 0.$$

Указанное обстоятельство является весьма важным. В общем случае в рассматриваемых планах сумма сочлененных произведений любых двух разных столбцов матрицы планирования равна нулю, т. е.:

$$\sum_{u=1}^N x_{i_u} x_{j_u} = 0, \quad i \neq j \quad (1.9)$$

Условие (1.9) носит название **ортогональности**.

В результате использования такого ортогонального плана система (1.8) принимает вид:

$$\begin{cases} b_0 \sum_{u=1}^N x_{0_u}^2 = \sum_{u=1}^N x_{0_u} y_u \\ b_1 \sum_{u=1}^N x_{1_u}^2 = \sum_{u=1}^N x_{1_u} y_u \\ b_2 \sum_{u=1}^N x_{2_u}^2 = \sum_{u=1}^N x_{2_u} y_u \end{cases} \quad (1.10)$$

Оказывается, что для расчета коэффициентов  $b_i$  не нужно собственно решать эту систему. Каждый коэффициент определяется независимо от другого из своего уравнения системы:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N x_{0_u} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{0_u}^2}; \quad b_1 = \frac{\sum_{u=1}^N x_{1_u} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{1_u}^2}; \quad b_2 = \frac{\sum_{u=1}^N x_{2_u} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{2_u}^2}.$$

или в общем виде:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, k, \quad (1.11)$$

где  $i$  - номер фактора.

Кроме того, поскольку выполняется условие нормировки (1.2), т. е. для любого столбца (таблицы 1.3.)  $\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 = N$ , формула (1.11) еще упрощается:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u} y_u}{N}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, k, \quad (1.12)$$

Таким образом, способ расчета коэффициентов в данном случае очень прост: для подсчета любого  $b_i$ , столбцу  $y$  следует приписать знаки соответствующего столбца  $x_i$ , сложить значения отклика с этими знаками и результат разделить на число опытов матрицы планирования.

В частности, обратим внимание на то, что в рассматриваемых случаях модели типа (1.3) характеризуют зависимость случайной величины зависимой переменной ( $y$ ) от неслучайных значений независимых ( $x$ ). В таких ситуациях уравнение типа (1.3) называют **уравнением регрессии** его *коэффициенты* — **коэффициентами регрессии**, а метод построения и анализа уравнений — **регрессионным анализом**.

При использовании регрессионного анализа — одного из методов математической статистики, требуется выполнение следующих исходных предпосылок: [8]

- 1) зависимая переменная (отклик) - случайная величина с нормальным законом распределения;
- 2) дисперсия в определении этой переменной не зависит от ее абсолютной величины;
- 3) факторы измеряются с пренебрежимо малой ошибкой по сравнению с ошибкой в определении отклика.

Поскольку коэффициенты регрессии рассчитывают по формуле, например (1.11), из результатов опытов, являющихся случайными величинами, то и сами коэффициенты являются случайными.

В общем случае эти коэффициенты имеют разные дисперсии и разную величину взаимной корреляции (различные **ковариации** и **коэффициенты корреляции**).

Все статистические свойства коэффициентов, а следовательно и уравнения регрессии, определяет обратная матрица  $A^{-1} = (X^T X)^{-1}$ , умноженная на оценку дисперсии опыта  $S_y^2$ . Эту матрицу часто называют **матрицей дисперсий - ковариаций** или **ковариационной**. **Нормированная ковариационная матрица** — это матрица  $M^{-1} S_y^2$ .

Можно показать [7], что матрица  $A^{-1} S_y^2$  имеет вид:

Отсюда получаются соотношения для оценок дисперсий коэффициентов регрессии ( $S_{y_i}^2$ ), их ковариаций ( $cov b_i b_j$ ) и коэффициентов корреляции между ними ( $rb_i b_j$ ):

Таким образом, при ортогональном планировании дисперсии оценок коэффициентов регрессии рассчитывают по формуле

$$A^{-1}S_y^2 = (X^T X)^{-1} S_y^2 = \begin{vmatrix} c_{00} \dots c_{01} \dots \dots \dots c_{0k} \\ c_{10} \dots c_{11} \dots \dots \dots c_{1k} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ c_{k0} \dots c_{k1} \dots \dots \dots c_{kk} \end{vmatrix} S_y^2 =$$

$$= \begin{vmatrix} S_{b_0}^2 \dots \text{cov } b_0 b_1 \dots \dots \dots \text{cov } b_0 b_k \\ \text{cov } b_0 b_1 \dots S_{b_1}^2 \dots \dots \dots \text{cov } b_1 b_k \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \text{cov } b_0 b_k \dots \text{cov } b_1 b_k \dots \dots \dots S_{b_k}^2 \end{vmatrix}, \quad (1.13)$$

$$S_{b_i}^2 = c_{ii} S_y^2; \quad (1.14)$$

$$\text{cov } b_i b_j = c_{ij} S_y^2; \quad (1.15)$$

$$rb_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sqrt{c_{ii} c_{jj}}}; \quad (1.16)$$

где  $c_{ii}$ ,  $c_{jj}$ ,  $c_{ij}$ , — соответствующие элементы матрицы  $(X^T X)^{-1}$ .

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{u=1}^N x_{1_u}^2}, \quad (1.17)$$

или, если выполняется условие нормировки (1.2), по формуле:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{N}, \quad (1.18)$$

Все же ковариации, а следовательно, и коэффициенты корреляции между оценками коэффициентов равны нулю, что лишний раз подтверждает независимость рассчитанных коэффициентов друг от друга.

Определим теперь оценку дисперсии предсказанного по уравнению значения отклика  $S_y^2$ , где  $\hat{y}$  — рассчитанное значение. Поскольку коэффициенты  $b_i$  являются случайными величинами, результаты расчета  $\hat{y}$  также являются случайными. Поэтому, по закону сложения ошибок [10], величина  $\hat{y}_u$ , рассчитанная для  $u$ -й точки факторного пространства:

$$\hat{y}_u = b_0 + b_1 x_{1_u} + b_2 x_{2_u} + \dots + b_k x_{k_u}, \quad (1.19)$$

должна иметь дисперсию:

$$S_{\hat{y}_u}^2 = \sum_{0 \leq i \leq k} \left[ \frac{\partial y}{\partial b_i} \right]_u^2 S_{b_i}^2 + \sum_{0 \leq i \leq k} \left[ \frac{\partial^2 y}{\partial b_i \partial b_j} \right]_u \text{cov } b_i b_j, \quad (1.20)$$

Поскольку для модели (1.19)  $\left[ \frac{\partial y}{\partial b_i} \right]_u^2 = x_{i_u}^2$ , а для ортогональных планов  $\text{cov } b_i b_j = 0$  и по формуле (1.18) - одинаковая величина для всех коэффициентов, можно записать

$$S_{\hat{y}_u}^2 = \sum_{i=0}^k x_{i_u}^2 S_{b_i}^2 = S_{b_i}^2 \sum_{i=0}^k x_{i_u}^2 = \frac{S_y^2}{N} (1 + x_{1_u}^2 + x_{2_u}^2 + \dots + x_{k_u}^2), \quad (1.21)$$

или

$$S_{\hat{y}_m}^2 = \frac{S_y^2}{N} (1 + p_m^2), \quad (1.22)$$

где  $p_u^2 = (x_{1_u}^2 + x_{2_u}^2 + \dots + x_{k_u}^2)$ .

Таким образом, дисперсия предсказанного уравнением регрессии значения  $\hat{y}_u$  зависит от экспериментальной ситуации ( $S_y^2/N$ ) и радиуса ( $p_u^2$ ) сферы (в общем случае гиперсферы) с центром в основном уровне. Следовательно, в любом направлении на одинаковом расстоянии от центра эксперимента (при равном  $p$ ) полученное уравнение предсказывает с одинаковой точностью ( $S_y^2$  — одинаковые величины). Планы, для которых выполняется условие (1.22), получили название **ротатабельных**. Естественно, что в задачах оптимизации, когда предстоит из исходной точки двинуться к экстремуму, случай ротатабельности более предпочтителен, ведь направление движения заранее неизвестно, а потому хотелось бы иметь в любом направлении одинаковые возможности.

Указанные выше свойства планов - **симметричность** (1.1), **нормировка** (1.2), **ортогональность** (1.9), **ротатабельность** (1.22) - лишь некоторые из возможных.

В общем же случае можно выбирать разные строки матрицы  $X$ , т. е. составлять различные планы эксперимента, обладающие теми или иными нужными экспериментатору свойствами.

Для оценки и сравнения планов используют математические критерии их оптимальности, которые обычно связывают со строением ковариационной матрицы или с организацией и порядком проведения опытов.

Таких критериев может быть много (см. например [6]), и это позволяет выбирать планы, удовлетворяющие разнообразным требованиям, возникающим при решении конкретных экспериментальных задач.

## 2. Критерии оптимальности планов

Критерии оптимальности планов и способы организации эксперимента удобно делить на *три группы* [8].

В *первую группу* входят критерии, связанные с точностью оценок коэффициентов регрессии. Сюда относятся такие свойства планов, как их ортогональность, *D*-, *A*-, *E*- оптимальность и другие. Этим критериям можно дать геометрическую интерпретацию в пространстве коэффициентов  $b_0, b_1, \dots, b_k$ . Оценки этих коэффициентов, как уже отмечалось, являются случайными величинами, а потому имеют разброс, который может быть охарактеризован эллипсоидом рассеяния оценок. Ориентировка, форма и объем эллипсоида полностью определяются выбранным планом эксперимента, точнее строением информационной  $M$  или ковариационной  $M^{-1}$  матрицы. Перечислим некоторые критерии первой группы [8].

**Ортогональность** (1.9) - очень удобное свойство планов. Она, как уже отмечалось, приводит матрицы  $M$  и  $M^{-1}$  к диагональному виду, позволяет оценивать все коэффициенты регрессии независимо друг от друга и потому упрощать или усложнять модели, исключая или добавляя новые коэффициенты без пересчета уже найденных.

Число вычислений при этом минимально. Эллипсоид рассеяния ориентирован таким образом, что направления его главных осей совпадают с направлением координатных осей в пространстве коэффициентов.

**D-оптимальными** (но начальной букве английского слова determinant, т. е. определить) называют планы, которым соответствуют минимальный определитель ковариационной матрицы  $M^{-1}$  или, что то же самое, максимальный определитель информационной матрицы  $M$ . Определитель ковариационной матрицы пропорционален объему эллипсоида рассеяния. Следовательно, **D-оптимальность** приводит к получению эллипсоида рассеяния оценок коэффициентов минимального объема. В статистическом смысле **D-оптимальность** обеспечивает минимум обобщенной дисперсии всех оценок коэффициентов.

Можно составлять планы, обеспечивающие минимум обобщенной дисперсии не всех, а только части оценок коэффициентов. Такие планы называют усеченными **D-оптимальными**. В этом случае требуется минимизировать не определитель матрицы  $M^{-1}$ , а определитель ее подматрицы, соответствующей интересующим экспериментатора коэффициентам [8].

**A-оптимальными** (от английского выражения average variance, т. е. средняя дисперсия) называют планы, которым соответствует минимальное значение следа (т. е. суммы диагональных элементов) ковариационной матрицы. Поскольку на диагонали ковариационной матрицы находятся дисперсии оценок коэффициентов, **A-оптимальность** обеспечивает минимум суммы дисперсий этих оценок без учета их ковариаций или, другими словами, минимум средней дисперсии оценок. При этом эллипсоид

рассеяния имеет минимальную сумму квадратов длин осей и наименьшую длину диагонали прямоугольника, описанного около этого эллипсоида.

***E-оптимальным*** (от английского выражения *elgen value, t. e.* собственное значение) планам соответствует наименьшее максимальное собственное значение (характеристическое число) [1] ковариационной матрицы  $M^{-1}$  или, что то же самое, наибольшее минимальное собственное число информационной матрицы  $M$ .

***E-оптимальность*** минимизирует длину максимальной оси эллипсоида рассеяния оценок коэффициентов, т. е. не позволяет ему приобрести слишком вытянутую форму. Со статистической точки зрения она не дает возможности некоторым оценкам коэффициентов иметь слишком большие дисперсии и ковариации.

Критерии оптимальности ***второй группы*** определяют точность предсказания значений отклика с помощью построенной модели. Сюда относятся такие свойства планов, как их ротатабельность, равномерность, ***G-*** и ***Q-оптимальность***, максимальная точность оценки координат экстремума и др. Опишем некоторые из них [8].

***Ротатабельность*** (от английского *rotatable, т. е.* способный к вращению), как уже было показано выше, обеспечивает одинаковую точность предсказания для точек, равно удаленных от центра плана по любому направлению. Иными словами, дисперсии предсказания инвариантны (независимы) относительно вращения координатных осей факторного пространства.

***Униформность*** (от английского *uniform, т. е.* равномерный) в дополнении к ротатабельности требует, чтобы в некоторой области вокруг центра плана дисперсия предсказания оставалась примерно постоянной.

***G-оптимальные*** (от английского выражения *general variance, т.е.* общая дисперсия) планы минимизируют максимально возможную дисперсию предсказания. Они гарантируют отсутствие в области эксперимента точек, имеющих слишком низкую точность оценки функции отклика.

***Q-оптимальные*** планы минимизируют среднюю дисперсию предсказания.

К ***третьей группе*** можно отнести свойства планов, связанные со стратегией экспериментирования. Укажем некоторые из них [8].

В большинстве задач естественно стремление экспериментатора к минимизации числа опытов. Этот минимум задается числом коэффициентов модели, а приближение к нему служит мерой насыщенности плана.

Важным является шаговый принцип планирования эксперимента. С ним связана и композиционность планов. При композиционной стратегии эксперимент реализуется по частям, шаг за шагом. Решение о продолжении эксперимента на каждом последующем шаге принимают только по результатам предыдущего. Композиционные планы предполагают постепенное усложнение строящейся модели.

Подчеркнем, что выбор критерия оптимальности и способа проведения эксперимента осуществляют, исходя из конкретного содержания решаемой задачи. Построить планы, удовлетворяющие одновременно многим критериям оптимальности, удается только в отдельных случаях. В частности, рассмотренные выше планы полного факторного эксперимента типа  $2^k$ , как и регулярные планы типа  $2^{k-p}$ , являются одновременно  $D$ -,  $A$ -,  $E$ - и  $G$ -оптимальными. Кроме того, они ортогональны и ротатабельны. Но так бывает редко.

Сравнивая критерии между собой, можно отметить, что, например, для критериев *первой группы* величина определителя ковариационной матрицы  $M^{-1}$  (т. е.  $D$ -оптимальность) является более полной численной характеристикой по сравнению с другими критериями. Действительно, критерий  $D$ -оптимальности учитывает все элементы ковариационной матрицы, в то время, как, критерий  $A$ -оптимальности учитывает только диагональные элементы. Кроме того, поскольку определитель матрицы является произведением ее собственных чисел, критерий  $D$ -оптимальности является более полной характеристикой по сравнению с  $E$ -оптимальностью. В ряде случаев  $D$ -оптимальные планы оказываются одновременно и  $G$ -оптимальными.



### 3. Проведение эксперимента и статистическая Обработка его результатов

После выбора плана переходят непосредственно к эксперименту. Чтобы исключить влияние систематических ошибок, вызванных внешними условиями (например, неточным контролем, изменение влажности, участие разных людей в проведении эксперимента и др.), рекомендуется опыты, заданные планом эксперимента, проводить **рандомизировано** во времени, т. е. в случайной последовательности. Порядок проведения опытов можно выбирать, например, по таблице **случайных чисел**.

При организации эксперимента следует учитывать необходимость иметь оценку дисперсии опыта  $S_y^2$ . Эта дисперсия может быть известна и до начала опытов, например, по аналогичным ранее проведенным работам, но обычно ее оценивают в процессе эксперимента. Единственная возможность это сделать — повторять (дублировать) опыты.

Под **дублированием** здесь понимается не серия измерений в одном опыте («несколько данных на точку»), а **полное повторение опыта**. Схемы статистической обработки результатов экспериментов при проведении как дублирующих опытов, так и серий измерений в каждом опыте подробно рассмотрены, например в работах В. А. Вознесенского [2].

В зависимости от характера дублирования возможно несколько способов оценки дисперсии [8.]

Если все опыты, заданные планом, выполняют по одному разу, а один из них (чаще в центре плана) дублируют несколько раз, то дисперсию опыта рассчитывают по формуле

$$S_y^2 = \frac{\sum_{g=1}^{n_0} (y_{0g} - \bar{y}_0)^2}{f_1}, \quad (3.1)$$

где  $y_{0g}$  - результат  $g$ -го дубля (повтора) опыта в центре плана;

$\bar{y}_0$  - среднее арифметическое значение всех  $n_0$  дублей центрального опыта;

$f_1$  - число степеней свободы.

**Число степеней свободы** — понятие, учитывающее в статистических ситуациях связи, ограничивающие свободу изменения случайных величин. Это число определяется как разность между числом выполненных опытов и числом констант (средних, коэффициентов и пр.), подсчитанных по результатам тех же опытов. [8]

В данном случае при определении  $S_y^2$  по формуле (3.1) требуется предварительно подсчитать одну константу  $\bar{y}_0$ . Поэтому в данном случае:

$$f_1 = n_0 - 1, \quad (3.2)$$

Закончив эксперимент, по формулам (1.11) или (1.12) в случае ортогонального планирования, **рассчитывают коэффициенты регрессии.**

После расчета коэффициентов проверяют гипотезу об их **статистической значимости.**

Для проверки гипотезы о статистической значимости коэффициентов регрессии прежде всего рассчитывают дисперсию оценок коэффициентов. Делают это в общем случае по формуле (1.14), а при ортогональном планировании - по формулам (1.17) или (1.18).

При ортогональном планировании значимость коэффициентов можно проверять двумя равноценными способами. В одном случае можно сравнить абсолютную величину коэффициента с его доверительным интервалом, рассчитываемым по формуле:

$$\Delta b_i = t_{a;f_1} S b_i, \quad (3.3)$$

где  $t$  - критерий Стьюдента, берется из таблиц (см. приложение 1) в зависимости от уровня значимости  $a$  и числа степеней свободы  $f_1$  при определении дисперсии опыта  $S_y^2$ ;  $S b_i$  - среднеквадратичная ошибка в определении коэффициента регрессии.

Коэффициент считается статистически значимым, когда его абсолютная величина больше доверительного интервала или равна ему, т. е.

$$|b_i| \geq \Delta b_i, \quad (3.4)$$

или

$$|b_i| \geq t_{a;f_1} S b_i, \quad (3.5)$$

Смысл последнего неравенства заключается в том, что абсолютная величина коэффициента должна быть в  $t$  раз больше, чем ошибка его определения.

В другом случае, значимость коэффициентов можно проверять по  $t$  - критерию, рассчитывая его по формуле

$$t^{расч} = \frac{|b_i|}{S b_i}, \quad (3.6)$$

Коэффициент значим, если  $t^{расч}$  больше или равен  $t_{a;f_1}^{табл}$ .

$$t^{расч} \geq t_{a;f_1}^{табл}, \quad (3.7)$$

Статистическая не значимость коэффициента интерпретируется как отсутствие влияния соответствующего эффекта. Если модель линейная и соответственно незначим линейный эффект, можно считать, что данный фактор в изученных интервалах его изменения на отклик не влияет. При ортогональном планировании статистически незначимые коэффициенты из модели могут быть исключены, при этом пересчет остальных коэффициентов не требуется.

Указанный способ построения доверительных интервалов для каждого из коэффициентов в общем случае оценки их статистической значимости является недостаточным. Строго говоря, следует оценивать совместную доверительную область одновременно для всех коэффициентов [5, 7],

которая и представляет собой упоминавшийся в разделе 2 **эллипсоид рассеяния** оценок коэффициентов регрессии. Доверительный интервал для отдельного коэффициента можно тогда установить, если выбрать некоторые фиксированные значения для остальных коэффициентов. Поэтому при неортогональном планировании проверка статистической значимости коэффициентов является непростой задачей. Тем не менее рекомендуется и в этом случае проверять гипотезу о значимости коэффициентов по  $t$  - критерию [5, 7, 9]. Другим способом упрощения модели путем исключения из нее коэффициентов является последовательный регрессионный анализ [7].

Следующим этапом обработки данных является проверка гипотезы об **адекватности модели**, т. е. поиск ответа на вопрос, можно ли использовать полученное уравнение или необходима более сложная модель.

Гипотезу об адекватности чаще всего проверяют с помощью **F-критерия** (критерия Фишера). Его расчетное значение определяют по формуле

$$F_{f_1:f_2}^{расч} = \frac{S_{неад}^2}{S_y^2}, \quad (3.8)$$

В знаменателе этого выражения - дисперсия опыта  $S_y^2$ , определенная с  $f_1$  - числом степеней свободы, в числителе - так называемая **дисперсия неадекватности**  $S_{неад}^2$ , которую считают по формуле

$$S_{неад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (y_{u_{расч}} - y_{u_{эксн}})^2}{f_2} = \frac{SS_{неад}}{f_2}, \quad (3.9)$$

где  $y_{u_{расч}}$  и  $y_{u_{эксн}}$  - значения отклика в  $u$ -м опыте, соответственно

рассчитанные по уравнению регрессии и определенные экспериментально;

$f_2$  - число степеней свободы, определяемое как

$$f_2 = N - k' \quad (3.10)$$

где  $k'$  - число оставленных коэффициентов уравнения (**включая  $b_0$** );

$N$  - число опытов плана.

Таким образом, **F** - критерий, представляющий собой отношение дисперсии неадекватности и дисперсии опыта, по сути дела отвечает на вопрос, во сколько раз модель предсказывает хуже по сравнению с опытом [8].

Гипотезу об адекватности уравнения принимают в том случае, когда рассчитанное значение **F** -критерия не превышает табличного (см. приложение 2) для выбранного уровня значимости, т. е. когда

$$F^{расч} \leq F^{табл}, \quad (3.11)$$

Следует отметить, что формула (3.9) справедлива лишь при **отсутствии дублирования** опытов в матрице планирования.

При этом для расчета  $F$  -критерия используют дисперсию  $S_y^2$ , определенную по опытам, не входящим в план, например, **дублируя опыты в центре плана.**

#### 4. Общие представления о планах второго порядка

Планы экспериментов для построения модели второго порядка, имеющей вид

$$\eta = \beta_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} \beta_{ii} x_i^2, \quad (4.1)$$

где  $\eta$  - истинная величина отклика;

$\beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$  - истинные значения коэффициентов;

$k$  - число факторов.

Число членов этой модели

$$C_{k+2}^k = \frac{(k+1)(k+2)}{2}, \quad (4.2)$$

поэтому число опытов  $N$  для ее построения должно быть не меньше

$$N \geq \frac{(k+1)(k+2)}{2}, \quad (4.2)$$

Кроме того, необходимо, чтобы каждый фактор варьировался не менее чем на **трех уровнях**.

Опыты могут проводиться в одной из двух областей: на  $k$ -мерном гиперкубе  $|x_i| \leq 1$  или на  $k$ -мерном гипершаре  $\sum_{i=1}^k x_i^2 \leq 1$ .

По результатам опытов рассчитывают выборочные оценки коэффициентов модели (4.1) и строят уравнение регрессии

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2 \quad (4.3)$$

Расчет коэффициентов уравнения (4.3) обычно проводят методом наименьших квадратов, при этом в общем случае это делают по формуле

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4.4)$$

Используя среду Mathcad [4].

## 5. Симметричные композиционные ортогональные планы

Ортогональность упрощает вычислительные формулы и, что самое главное, дает возможность оценивать коэффициенты регрессии независимо друг от друга. Чтобы это было возможным, необходимо информационную матрицу иметь диагональной. Но для симметричных композиционных планов второго порядка в общем случае информационная матрица недиагональна. Таким образом, с помощью плана эксперимента оценить коэффициенты модели (4.3) независимо друг от друга нельзя.[8]

Действительно, анализ матрицы показывает, что

$$\sum_{u=1}^N x_{0u} x_{i_u}^2 \neq 0 \quad \text{и} \quad \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 x_{j_u}^2 \neq 0 ,$$

так как  $x_{0u}$  во всех опытах равно +1, а неотрицательные величины  $x_{i_u}^2$  не могут быть все равны нулю.

Добиться ортогональности можно с помощью следующего приема. Вначале необходимо преобразовать модель (4.3) к виду

$$y = \left[ b_0 + \lambda_2 \sum_{i=1}^k b_{ii} \right] + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} (x_i^2 - \lambda_2) , \quad (5.1)$$

где  $\lambda_2$ , определяется:

$$\lambda_2 = N^{-1} \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 .$$

т. е. является средним квадратом значений любого фактора.

Для того, чтобы сделать матрицу диагональной, осталось принять

$$\lambda_2 = \lambda_3^2 , \quad (5.2)$$

Это и есть условие **ортогональности**. [8]

Выясним, в каком случае оно выполняется:

$$N \sum_{u=1}^N (x_i^2 x_j^2)_u = \left[ \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 \right]^2 , \quad (5.3)$$

Из рассмотрения матрицы видно, что

$$\begin{cases} \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 = N_1 + 2\alpha^2 \\ \sum_{u=1}^N (x_i^2 x_j^2)_u = N_1 \end{cases} , \quad (5.4)$$

Имеем  $N = N_1 + 2k + n_0$ . Подставив в (5.3), получим

$$(N_1 + 2k + n_0)N_1 = (N_1 + 2\alpha^2)^2 .$$

Откуда

$$\alpha^2 = \frac{\sqrt{(N_1 + 2k + n_0)N_1} - N_1}{2}, \quad (5.5)$$

Таким образом, для того, чтобы план стал ортогональным, опыты следует проводить на расстоянии звездного плеча ( $\alpha$ ), величину которого подсчитывают по (5.5). Величина же ( $\alpha$ ) будет меняться в зависимости от числа опытов в ядре ( $N_1$ ) и в центре плана ( $n_0$ ), а также будет равной для задач с различным числом факторов  $k$ .

В таблице 5.1 приведены числовые значения  $\alpha^2$ , подсчитанные в [9] для планов с разными  $k$  и  $n_0$ .

В связи с ортогональностью плана оценки коэффициентов модели (5.1) определяют независимо друг от друга по формулам [8].

$$\left\{ \begin{array}{l} b'_0 = \frac{\sum_{u=1}^N y_u}{N}; \quad b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2} \\ b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N (x_i x_j)_u y_u}{\sum_{u=1}^N (x_i x_j)_u^2}; \quad b_{ii} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 y_u}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2} \end{array} \right. \quad (5.6)$$

Таблица 5.1 Значения  $\alpha^2$  (квадрат плеча)

$n_0$	$k$		
	2	3	4
1	1,000	1,477	2,000
2	1,160	1,650	2,164
3	1,317	1,831	2,390
4	1,475	2,000	2,580
5	1,606	2,164	2,770
6	1,742	2,325	2,950
7	1,873	2,481	3,140
8	2,000	2,633	3,310

Дисперсии оценок коэффициентов рассчитывают по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{b'_0}^2 = \frac{S_y^2}{N}; \quad S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2} \\ S_{b_{ij}}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{u=1}^N (x_i x_j)_u^2}; \quad S_{b_{ii}}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2} \end{array} \right. , \quad (5.7)$$

После расчета коэффициентов и проверки (при необходимости) их статистической значимости переходят к модели в обычной форме (4.3), рассчитав значение  $b_0$ :

$$b_0 = b_0' - \lambda_2 \sum_{i=1}^k b_{ii}, \quad (5.8)$$

Поскольку коэффициенты  $b_0'$  и  $b_{ii}$  оценены независимо друг от друга, дисперсия  $S_{b_0}^2$  определяется по закону накопления ошибок:

$$S_{b_0}^2 = S_{b_0'}^2 + \lambda_2^2 \sum_{i=1}^k S_{b_{ii}}^2 \quad (5.9)$$

С целью облегчения расчетов для указанных в (таблице 5.2) планов заранее подсчитаны константы, которые также приведены в (таблице 5.2) по данным [2].

Проверка адекватности полученного уравнения регрессии проводится по методике, описанной в разделе 3.

Таблица 5.2 Характеристики некоторых симметричных ортогональных композиционных планов и вспомогательные константы

	Число факторов ( $k$ )		
	2	3	4
Ядро плана	$2^2$	$2^3$	$2^4$
Число опытов в ядре ( $N_I$ )	4	8	16
Звездное плечо ( $\alpha$ )	1,000	1,215	1,414
Число звездных точек ( $2k$ )	4	6	8
Число опытов в центре ( $n_0$ )	1	1	1
Общее число опытов ( $N$ )	9	15	25
$\alpha_1$	0,11111	0,06667	0,04000
$\alpha_2$	0,16667	0,09141	0,05000
$\alpha_3$	0,25000	0,12500	0,06250
$\alpha_4$	0,50000	0,23041	0,12500
$\alpha_5$	0,33333	0,25820	0,20000
$\alpha_6$	0,40825	0,30234	0,22361
$\alpha_7$	0,50000	0,35355	0,25000
$\alpha_8$	0,70711	0,48001	0,35355



В случае, когда опыты не дублируются, коэффициенты модели, их дисперсии и среднеквадратичные ошибки считаются по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned}
 b'_0 &= \alpha_1 \sum_{u=1}^N y_u ; & b_i &= \alpha_2 \sum_{u=1}^N x_{i_u} y_u ; \\
 b_{ij} &= \alpha_3 \sum_{u=1}^N (x_i x_j)_u y_u ; & b_{ii} &= \alpha_4 \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 y_u ; \\
 S_{b'_0}^2 &= \alpha_1 S_y^2 ; & S_{b'_0} &= \alpha_5 S_y ; & S_{b_i}^2 &= \alpha_2 S_y^2 ; \\
 S_{b_i} &= \alpha_6 S_y ; & S_{b_{ij}}^2 &= \alpha_3 S_y^2 ; & S_{b_{ij}} &= \alpha_7 S_y ; \\
 S_{b_{ii}}^2 &= \alpha_4 S_y^2 ; & S_{b_{ii}} &= \alpha_8 S_y ;
 \end{aligned} \right\} , \quad (5.10)$$

Коэффициент  $b_0$  и его дисперсию определяют по формулам:

$$b_0 = b'_0 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \sum_{i=1}^k b_{ii} ; \quad S_{b_0}^2 = S_{b'_0}^2 + \left[ \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right]^2 S_{b_{ii}}^2 , \quad (5.11)$$

## 6. Симметричные композиционные ротатабельные планы

В случае использования любого симметричного плана дисперсия отклика, предсказанного по построенной модели, определяется следующим выражением [5]:

$$\begin{aligned}
 S_y^2 = & S_{b_0}^2 + S_{b_i}^2 \sum_{i=1}^k x_i^2 + S_{b_{ij}}^2 \sum_{i=1}^k x_i^2 x_j^2 + S_{b_{ii}}^2 \sum_{i=1}^k x_i^4 + \\
 & + 2 \operatorname{cov} b_0 b_{ii} \sum_{i=1}^k x_i^2 + 2 \operatorname{cov} b_{ii} b_{jj} \sum_{i=1}^k x_i^2 x_j^2 = \frac{S_y^2}{N} \left[ (c-d) \sum_{i=1}^k x_i^4 + \right. \\
 & \left. + (\lambda_3^{-1} - 2d) \sum_{i=1}^k x_i^2 x_j^2 + a + (\lambda_2^{-1} - 2b) \sum_{i=1}^k x_i^2 \right]
 \end{aligned} \quad (6.1)$$

Отсюда видно, что соответствующие модели предсказывают значение отклика в разных направлениях факторного пространства с разной точностью.

Вместе с тем оказалось, что можно построить план, обеспечивающий получение модели, предсказывающей значение отклика с одинаковой дисперсией во всех точках факторного пространства, находящихся на одинаковом расстоянии от центра. Как уже отмечалось в разделе 2, такого рода планы получили название **ротатабельных**. Особенно удобно ротатабельные планы применять в тех случаях, когда эксперимент проводится в области экстремума, но точные координаты экстремальной точки еще предстоит найти. Тогда ротатабельность обеспечивает равные возможности для поиска экстремума в разных направлениях. Кроме того, было показано, что ротатабельные планы минимизируют систематическую ошибку, возникающую вследствие неадекватности функции отклика, когда полином второго порядка применяется для аппроксимации поверхности, являющейся на самом деле поверхностью третьего порядка. Выведем теперь, вслед за авторами работы [5], условие, при котором симметричные планы второго порядка становятся ротатабельными. [8]

Если план ротатабельный, то дисперсия предсказания должна зависеть только от радиуса  $r$  сферы с центром в центре плана:

$$S_y^2 = A + Br^2 + Cr^4, \quad (6.2)$$

где

$$\left. \begin{aligned}
 r^2 &= \sum_{i=1}^k x_i^2 \\
 r^4 &= \sum_{i=1}^k x_i^4 + 2 \sum_{i=1}^k x_i^2 x_j^2
 \end{aligned} \right\}, \quad (6.3)$$

Анализ показывает, что от (6.1) к (6.2) можно перейти, если будет выполняться следующее соотношение:

$$2S_{b_{ii}}^2 = S_{b_{ij}}^2 + 2 \text{cov} b_{ii} b_{jj} , \quad (6.4)$$

или

$$2(c - d) = \lambda_3^{-1} + 2d , \quad (6.5)$$

откуда  $2c = \lambda_3^{-1}$ . Но  $c = (\lambda_4 - \lambda_3)^{-1}$ , следовательно

$$\lambda_4 = 3\lambda_3 , \quad (6.6)$$

Это и есть условие **ротатабельности** плана. [8]

Формула для вычисления звездного плеча симметричных ротатабельных композиционных планов:

$$\alpha = \sqrt[4]{N_1} , \quad (6.7)$$

Число опытов в центре ротатабельного плана определяется безразмерным моментом  $\lambda_3^*$ , [5]:

$$\lambda_3^* = \frac{\lambda_3}{\lambda_3^2} ;$$

откуда

$$n_0 = \lambda_3^*(N_1 + 4\sqrt{N_1} + 4) - N_1 - 2k , \quad (6.8)$$

Возможно несколько подходов к заданию величины  $\lambda_3^*$ . Рассмотрим два из них. [8]

**Одни подход** требует выполнения так называемой **униформности** планирования. Униформность предполагает, что дисперсия предсказания сравнительно мало меняется (или совсем не меняется) в радиусе от центра плана до  $\pm 1$  значений факторов в кодированном масштабе, или, что то же самое, на участке  $0 \leq r \leq 1$ . Показано [5], что для того, чтобы это условие выполнялось, величину  $\lambda_3^*$  надо брать в виде положительного корня уравнения:

$$2\lambda_3^*(\lambda_3^* - 1)(k + 2) + \lambda_3^*(k + 1) - (k - 1) = 0 ;$$

или

$$\lambda_3^{*2} (2k + 4) - \lambda_3^*(k + 3) - (k - 1) = 0 , \quad (6.9)$$

Таблица 6.1. Значения  $\lambda_3^*$ , обеспечивающие униформность

$k$	2	3	4	5	6	7
$\lambda_3^*$	0,7844	0,8385	0,8705	0,8918	0,9070	0,9185

Значения  $\lambda_3^*$ , рассчитанные по (6.9), для числа факторов  $k=2\dots 5$ , приведены в таблице 6.1.

Если число опытов  $n_0$  выбирают по (6.8) таким, что величина  $\lambda_3^*$  в точности соответствует значениям, приведенным в таблице 6.1, то дисперсия предсказанного значения отклика оказывается примерно одинаковой во всех

точках шара с центром в центре плана и радиусом  $r = \sqrt{\lambda_2}$ . Это, естественно, очень удобно в тех случаях, когда центр эксперимента находится вблизи экстремальной точки, например внутри указанного шара.

**Другой подход** позволяет сделать ротатабельные планы ортогональными. Для этого требуется лишь, чтобы выполнялось условие (5.2). Следовательно, ротатабельные планы становятся ортогональными, когда

$$\lambda_3^* = \frac{\lambda_3}{\lambda_3^2} = 1, \quad (6.10)$$

Таким образом, число опытов в центре  $n_0$  для ортогональных ротатабельных планов подсчитывают по формуле получающейся из (6.8) при  $\lambda_3^* = 1$ :

$$n_0 = 4\sqrt{N_1} - 2k + 4, \quad (6.11)$$

Расчет по формуле (6.8) в некоторых случаях дает дробные значения  $n_0$ , поэтому их приходится округлять до ближайшего целого числа, несколько нарушая тем самым условия равномерности или ортогональности. Однако эти отклонения оказываются столь незначительными, что ими можно пренебречь

Таблица 6.2 Симметричные ротатабельные композиционные планы

Номер плана	$k$	Ядро плана	$N_1$	$\alpha$	$2k$	$n_0$	N	$\lambda_3^*$	Примечание
1	2	$2^2$	4	1,414	4	1	9	0,56	У. П. О. П.
2						10	0,63		
3						11	0,69		
4						12	0,75		
5						13	0,81		
6						16	1,00		
7	3	$2^3$	8	1,682	6	1	15	0,64	У. П. О. П.
8						16	0,69		
9						17	0,73		
10						18	0,77		
11						20	0,85		
12						23	0,99		
13	4	$2^4$	16	2,000	8	1	25	0,69	У. П. О. П.
14						26	0,72		
15						27	0,75		
16						28	0,78		
17						31	0,86		
18						36	1,00		

Характеристики наиболее распространенных симметричных ротатабельных композиционных планов приведены в (таблице 6.2.) Там же приведены значения  $\lambda_3^*$ , позволяющие оценить степень близости плана к строго равномерному (сравнивать с  $\lambda_3^*$ , указанным в таблице 6.1) и строго ортогональному (в этом случае  $\lambda_3^*=1$ ). [8]

Расчет коэффициентов моделей после реализации ротатабельных ортогональных планов, а также оценку дисперсий коэффициентов проводят по тем же формулам (5.6, 5.7), что и для случая ортогонального планирования.

Кроме того, коэффициенты моделей после реализации планов, указанных в (таблице 6.2), удобно рассчитывать по формулам

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= c_1 \sum_{u=1}^N y_u - c_2 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 y_u ; \\ b_i &= c_3 \sum_{u=1}^N x_{i_u} y_u ; \quad b_{ij} = c_4 \sum_{u=1}^N (x_i x_j)_u y_u ; \\ b_{ii} &= c_5 \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 y_u + c_6 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2 y_u - c_2 \sum_{u=1}^N y_u ; \end{aligned} \right\} , \quad (6.12)$$

а их дисперсии, среднеквадратичные ошибки и ковариации по формулам

$$\left. \begin{aligned} S_{b_0}^2 &= c_2 S_y^2 ; \quad S_{b_0} = c_7 S_y ; \quad S_{b_i}^2 = c_3 S_y^2 ; \quad S_{b_i} = c_8 S_y ; \\ S_{b_{ij}}^2 &= c_4 S_y^2 ; \quad S_{b_{ij}} = c_9 S_y ; \quad S_{b_{ii}}^2 = (c_5 + c_6) S_y^2 ; \\ S_{b_{ii}} &= c_{10} S_y ; \quad \text{cov } b_0 b_{ii} = -c_2 S_y^2 ; \quad \text{cov } b_{ii} b_{jj} = c_3 S_y^2 ; \end{aligned} \right\} , \quad (6.13)$$

Вспомогательные константы  $c_i$  подсчитаны заранее и для планов из (таблицы 6.2) указаны в (таблице 6.3).

При использовании ротатабельных, как, впрочем, всех описываемых ниже неортогональных планов, появляются особенности в статистическом анализе полученных результатов. В частности, после расчета доверительных интервалов коэффициентов во формуле (3.3) и сравнения их с абсолютными значениями коэффициентов, исключать из модели без пересчета остальных можно только статистически незначимые оценки  $b_i$ , и  $b_{ij}$ . Для коэффициентов  $b_0$  и  $b_{ii}$  ковариации  $\text{cov } b_0 b_{ii}$  и  $\text{cov } b_{ii} b_{jj}$  отличим от нуля. Поэтому исключение любого из этих коэффициентов требует пересчета остальных в данной группе. Новые значения коэффициентов  $b_0$ ,  $b_{ii}$  и их дисперсий теперь уже следует считать по формуле (4.4).

Проверка адекватности полученного уравнения регрессии проводится по методике, описанной в разделе 3.

Таблица 6.3 Вспомогательные константы для ротатбельных планов

Номер плана	$k$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$
1	2	1,00000	0,50000	0,12500	0,25000	0,12500
2		0,50000	0,25000	0,12500	0,25000	0,12500
3		0,33333	0,16667	0,12500	0,25000	0,12500
4		0,25000	0,12500	0,12500	0,25000	0,12500
5		0,20000	0,10000	0,12500	0,25000	0,12500
6		0,12500	0,06250	0,12500	0,25000	0,12500
7	3	0,98835	0,33744	0,07322	0,12500	0,06250
8		0,49707	0,16971	0,07322	0,12500	0,06250
9		0,33201	0,11335	0,07322	0,12500	0,06250
10		0,24927	0,08511	0,07322	0,12500	0,06250
11		0,16635	0,05680	0,07322	0,12500	0,06250
12		0,11096	0,03787	0,07322	0,12500	0,06250
	4	0,99998	0,24999	0,04167	0,06250	0,03125
		0,50000	0,12500	0,04167	0,06250	0,03125
		0,33327	0,08332	0,04167	0,06250	0,03125
		0,25000	0,06250	0,04167	0,06250	0,03125
		0,14287	0,03571	0,04167	0,06250	0,03125
		0,05333	0,02083	0,04167	0,06250	0,03125

Продолжение таблицы 6.3

Номер плана	$k$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$	$c_{10}$
1	2	0,21875	1,00000	0,35355	0,50000	0,58630
2		0,09375	0,70711	0,35355	0,50000	0,46771
3		0,05208	0,57735	0,35355	0,50000	0,42081
4		0,03125	0,50000	0,35355	0,50000	0,39528
5		0,01875	0,44721	0,35355	0,50000	0,37914
6		0	0,35355	0,35355	0,50000	0,35355
7	3	0,10271	0,99416	0,27059	0,35355	0,40646
8		0,04544	0,70503	0,27059	0,35355	0,32854
9		0,02620	0,57620	0,27059	0,35355	0,29783
10		0,01656	0,49927	0,27059	0,35355	0,28118
11		0,00689	0,40786	0,27059	0,35355	0,26342
12		0,00044	0,33311	0,27059	0,35355	0,25091
13	4	0,05729	0,99999	0,20413	0,25000	0,29756
14		0,02604	0,070711	0,20413	0,25000	0,23935
15		0,01562	0,57730	0,20413	0,25000	0,21649
16		0,01042	0,50000	0,20413	0,25000	0,20413
17		0,00372	0,37798	0,20413	0,25000	0,18702
18		0	0,28867	0,20413	0,25000	0,17678

## 7. Симметричные композиционные планы типа $V_k$

Выбор звездного плеча  $\alpha$  и числа центральных опытов в рассмотренных выше планах определялся условиями ротатабельности или ортогональности. Эти критерии вполне разумны, но не являются единственно возможными. Как уже отмечалось в разделе 2, в современной математической теории эксперимента рассматривается значительно большее число критериев оптимальности. Можно, например, потребовать, чтобы план обеспечивал получение наименьшего объема эллипсоида рассеяния оценок коэффициентов ( $D$ -оптимальность); их минимальной средней дисперсии ( $A$ -оптимальность); минимума максимальной дисперсии оценок коэффициентов; минимума максимальной ( $G$ -оптимальность) или средней ( $Q$ -оптимальность) дисперсии предсказания значений отклика в заданной области факторного пространства; максимальной точности оценки координат экстремума и др. Все эти критерии определяются главным образом строением и свойствами информационной матрицы  $M=1/N (X^T X)$  или,  $M^{-1}$  [8].

Одним из наиболее сильных был признан критерий  $D$ -оптимальности [3].  $D$ -оптимальными являются планы, имеющие максимальное значение определителя матрицы  $M$  или минимальное - матрицы  $M^{-1}$ . Для выбора планов, отвечающих этому критерию, в работах [11...13] было введено понятие **непрерывного плана**. В этом случае рассматривается не дискретное распределение заданного числа опытов по отдельным экспериментальным точкам, а некоторая непрерывная функция, определяющая частоту наблюдений в точках плана. Поскольку эта частота может принимать любые значения между нулем и единицей, непрерывный план в общем случае не содержит конечного числа точек. По сути дела непрерывный план определяет непрерывное распределение «экспериментальных усилий», принимаемых за единицу, по исследуемой области факторного пространства. Однако в дальнейшем было показано, что при некоторых ограничениях почти всегда можно составить непрерывные  $D$ -оптимальные планы с конечным числом точек. К сожалению, для того, чтобы точно соблюсти требуемое  $D$ -оптимальностью распределение наблюдений по точкам плана, как правило, приходится назначать очень большое число опытов. В связи с этим были решены задачи аппроксимации непрерывных  $D$ -оптимальных планов точными планами, содержащими разумное число опытов и в то же время возможно меньше отличающимися от непрерывных планов по  $D$ -оптимальности [8].

В частности, анализ непрерывных симметричных планов второго порядка [3] показал, что максимальное значение определителя информационной матрицы, а потому и  $D$ -оптимальность, достигаются в том случае, когда моменты плана соответственно равны:

$$\lambda_2 = \frac{k+3}{(k+1)(k+2)} \left[ 1 + (k-1) \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \right] \quad \text{при } k=1, \quad (7.1)$$

$$\lambda_3 = \frac{2k+1 + \sqrt{4k^2 + 12k + 17}}{4(k+2)} \lambda_2 \quad \text{при } k > 1, \quad (7.2)$$

$$\lambda_4 = \lambda_2, \quad (7.3)$$

При этом оказалось, что условие (7.3) выполняется в том случае, когда план содержит только точки с координатами  $0$  и  $\pm 1$ .

Так были составлены симметричные композиционные планы типа  $B_k$  [2], состоящие, как и всякие композиционные планы, из ядра и звездных точек, но звездные плечи которых, для выполнения условия (7.3), были приняты  $\alpha=1,0$ . Опытов в центре такие планы **не содержат**. Их характеристики приведены в (таблице 7.1). В этой же таблице по данным [6] указаны значения так называемых приведенных определителей  $|\tilde{M}^{-1}|$  для планов  $D$ -оптимальных и  $B_k$ . Хорошо видно, что планы  $B_k$  мало отличаются от идеальных  $D$ -оптимальных.

После реализации планов типа  $B_k$ , рассчитываются коэффициенты модели. Для облегчения расчетов можно пользоваться и формулами (6.12) и (6.13). Вспомогательные константы  $c_i$ , входящие в эти формулы, для рассматриваемых планов приведены в (таблице 7.2) [8].

Таблица 7.1 Симметричные композиционные планы типа  $B_k$

Номер плана	$k$	Ядро плана	$N_I$	$2k$	$N$	$ \tilde{M}^{-1} $	
						$B_k$	$D$ -опт.
1	2	$2^2$	4	4	8	1,48	1,45
2	3	$2^3$	8	6	14	1,47	1,45
3	4	$2^4$	16	8	24	1,48	1,43

Таблица 7.2 Вспомогательные константы для планов типа  $B_k$

Номер плана	$k$	Число $b_{ii}$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$
1	2	2	1,25000	0,75000	0,16667	0,25	0,5
		1	0,50000	0,50000			
2	3	3	0,40625	0,15625	0,10000	0,125	0,5
		2	0,34610	0,19230			
		1	0,25000	0,25000			
3	4	4	0,22917	0,06250	0,05556	0,0625	0,5
		3	0,21929	0,07895			
		2	0,20238	0,10714			
		1	0,16667	0,16667			
		0	0,04167	0			



Продолжение таблицы 7.2

Номер плана	$k$	Число $b_{ii}$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$	$c_{10}$
1	2	2 1	0,2500 0,1670	1,11803 0,70711	0,40825	0,5	0,86603 0,81670
2	3	3 2 1	0,0937 0,1154 0,1500	0,63738 0,58830 0,50000	0,31623	0,35355	0,63742 0,62016 0,59161
3	4	4 3 2 1 0	0,1042 0,1316 0,1786 0,2778 0	0,47872 0,46828 0,44987 0,40825 0,20413	0,23571	0,25	0,62913 0,60696 0,56692 0,47138 0,70711

Планы  $B_k$  неортогональны, для оценок  $b_0$  и  $b_{ii}$  ковариации  $covb_0b_{ii}$  и  $covb_{ii}b_{ij}$  не равны нулю. Поэтому после расчета по формуле (3.3) доверительных интервалов для этих коэффициентов и проверки по (3.4) их статистической значимости исключение незначимых коэффициентов требует пересчета  $b_0$ ,  $b_{ii}$  их дисперсий и ковариаций [8].

Статистически незначимые коэффициенты  $b_i$  и  $b_{ij}$  можно исключить из модели без пересчета остальных.

Проверка адекватности полученного уравнения регрессии проводится по методике, описанной в разделе 3.

## 8. Анализ моделей второго порядка

Планирование второго порядка заканчивается отысканием адекватного квадратичного уравнения типа (4.3): [8]

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2$$

Часть членов, признанных статистически незначимыми, может в этом уравнении отсутствовать. Естественно далее проанализировать полученную модель, т. е. представить себе характер изменения отклика в изученной области, а при решении экстремальной задачи - попытаться выяснить, существует ли экстремум, и если он есть, найти его координаты. Однако анализировать уравнение второй степени в форме (4.3) хотя и можно, но сложно, Обычно его преобразовывают к так называемому **каноническому** (стандартному) виду.

**Каноническое преобразование** заключается в выборе новой системы координат, в которой значительно облегчается геометрический анализ уравнения. Такого рода преобразование сводится к определению центра поверхности второго порядка (разумеется, если он существует), переносу начала координат в новый центр (при этом в уравнении (4.3) исчезают линейные члены  $\sum b_i x_i$ ) и к повороту координатных осей (при этом в (4.3) исчезают члены  $\sum b_{ij} x_i x_j$ ) [8].

Квадратичное уравнение в канонической форме имеет вид:

$$y - y_s = B_{11} \tilde{X}_1^2 + B_{22} \tilde{X}_2^2 + \dots + B_{kk} \tilde{X}_k^2, \quad (8.1)$$

где  $y_s$  - значение отклика в новом начале координат (свободный член канонического уравнения);

$\tilde{X}_i$  - новые оси координат, повернутые в факторном пространстве на некоторый угол относительно старых осей ( $x_i$ ) и линейно связанные с ними;

$B_{ii}$  - коэффициенты уравнения в канонической форме (их часто называют **каноническими коэффициентами**).

Удобство формы (8.1) для анализа и оптимизации определяется тем, что все  $\tilde{X}_i$  входят в нее в квадратах. Следовательно, изменение значений отклика зависят только от знака коэффициента и не зависят от направления движения по оси  $\tilde{X}_i$  от центра  $s$ . В частности,  $y$  будет возрастать всегда, когда изменяется  $\tilde{X}_i$ , имеющий при себе коэффициент  $B_{ii} > 0$ , и уменьшаться в случае, когда у  $\tilde{X}_i$  стоит коэффициент  $B_{ii} < 0$ .

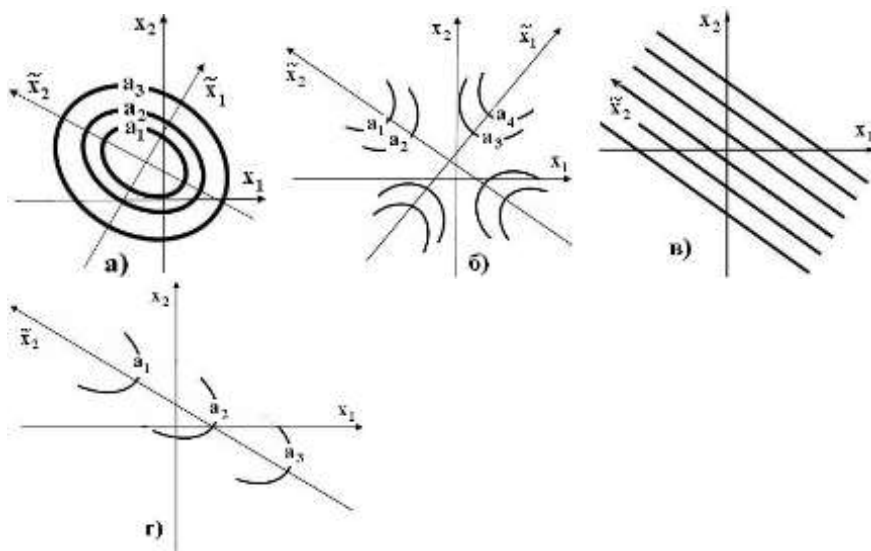


Рисунок 8.1 Поверхности отклика, описываемые квадратичной моделью  $k=2$

Если все коэффициенты  $B_{ii}$  отличны от нуля и центр поверхности  $s$  лежит в области эксперимента, то возможны следующие случаи: [8]

1) все  $B_{ii} < 0$ , тогда движение в любую сторону от центра только уменьшает отклик;

2) все  $B_{ii} > 0$ , тогда движение в любую сторону от центра увеличивает отклик;

3) часть  $B_{ii} < 0$ , часть  $B_{ii} > 0$ , тогда для увеличения отклика следует осуществлять движение из центра таким образом, чтобы значения  $\tilde{X}_i$ , для коэффициентов с отрицательным знаком равнялись нулю, т. е. искать экстремум вдоль осей с  $B_{ii} > 0$ ; наоборот, для уменьшения параметра оптимизации следует двигаться только вдоль осей с  $B_{ii} < 0$ .

Геометрический образ квадратичного уравнения в канонической форме можно представить себе в виде *изолиний* поверхности отклика при числе факторов  $k=2$  или в виде *изоповерхностей* при числе факторов  $k=3$ .

В случае  $k=2$  изолинии для уравнения  $y - y_s = B_{11}\tilde{X}_1^2 + B_{22}\tilde{X}_2^2$  могут представлять собой следующие фигуры: [8]

**Эллипсы** (рисунок 8.1, *a*). Оба коэффициента  $B_{11}$  и  $B_{22}$  имеют **одинаковые знаки**. Центр эллипсов  $s$  является максимумом, если  $B_{11}$  и  $B_{22}$  **отрицательны**, и минимумом, если  $B_{11}$  и  $B_{22}$  **положительны**. Если  $B_{22}$  по абсолютной величине меньше  $B_{11}$ , то эллипсы вытянуты по оси  $\tilde{X}_2$ , и наоборот.

Поверхность отклика является *эллиптическим параболоидом*. В этом случае для поиска экстремума достаточно поставить эксперименты в центре фигуры  $s$  и проверить, насколько хорошо значение отклика, предсказанное уравнением регрессии, совпадает с экспериментом.

**Гиперболы** (рисунок 8.1, б). Коэффициенты  $B_{11}$  и  $B_{22}$  имеют **разные знаки**. Гиперболы вытянуты по той оси, которой соответствует меньшее по абсолютной величине значение коэффициента в каноническом уравнении. В этом случае значение отклика увеличивается при движения из центра фигуры по одной оси и уменьшается – при движении по другой. Если, например,  $B_{11} > 0$ , а  $B_{22} < 0$ , ( $y - y_s = B_{11} \tilde{X}_1^2 + B_{22} \tilde{X}_2^2$ ), то отклик будет увеличиваться при движении из центра  $s$  в направлении  $+\tilde{X}_1$  и  $-\tilde{X}_1$  и уменьшаться при движении в направлении  $+\tilde{X}_2$  и  $-\tilde{X}_2$ . Центр  $s$  фигуры называется **седлом** или **минимаксом**. Поверхность отклика является **гиперболическим параболоидом**. Здесь направление движения выбирают в зависимости от того, чего необходимо достичь - максимума или минимума. Как и при крутом восхождении, можно наметить серию мысленных опытов, часть из которых можно реализовать.

**Параллельные прямые** (рис. 8.1, в). Один из коэффициентов канонического уравнения **равен нулю, при этом нет одного центра с экстремальным значением отклика**. Под определение центра здесь подходит любая точка на оси, соответствующей незначимому коэффициенту канонического уравнения. Поверхность отклика является **стационарным возвышением**.

**Параболы** (рисунок 8.1, г). Один из коэффициентов канонического уравнения **равен нулю, при этом центр фигуры находится в бесконечности**. Поверхность отклика является возрастающим возвышением (гребнем). В этом случае можно поместить начало координат в какую-либо точку (обычно вблизи центра эксперимента) на оси, соответствующей незначимому коэффициенту канонического уравнения, и получить таким образом **уравнение параболы**. Например, если равен нулю  $B_{22}$  то выбрав новый центр  $s'$ , можно получить уравнение параболы  $y - y_{s'} = B_{11} \tilde{X}_1^2 + B_2 \tilde{X}_2^2$ , где  $B_2$  - коэффициент, определяющий крутизну наклона возвышения, т. е. скорость увеличения параметра оптимизации по оси  $\tilde{X}_2$ . В практических задачах часто центр фигуры  $s$  удален за пределы той области, где проводился эксперимент, и тогда один из коэффициентов ( $B_{11}$  или  $B_{22}$ ) близок к нулю. В этом случае в зависимости от наклона, поверхность отклика будет аппроксимироваться либо стационарным, либо возрастающим возвышением.

Аналогично можно проводить анализ канонических уравнений типа  $y - y_s = B_{11} \tilde{X}_1^2 + B_{22} \tilde{X}_2^2 + B_{33} \tilde{X}_3^2$ , при числе факторов  $k=3$  (рисунок 8.2). [8]

Например, если все коэффициенты имеют **одинаковые знаки**, поверхность отклика представляет собой **эллипсоид вращения** (рисунок 8.2. а) и имеет экстремум в центре эллипсоида.

Если знак одного из коэффициентов **противоположен знаку** двух других, имеет место **одно- или двуполостной гиперболоид** (соответственно рисунок 8,2, б и в).

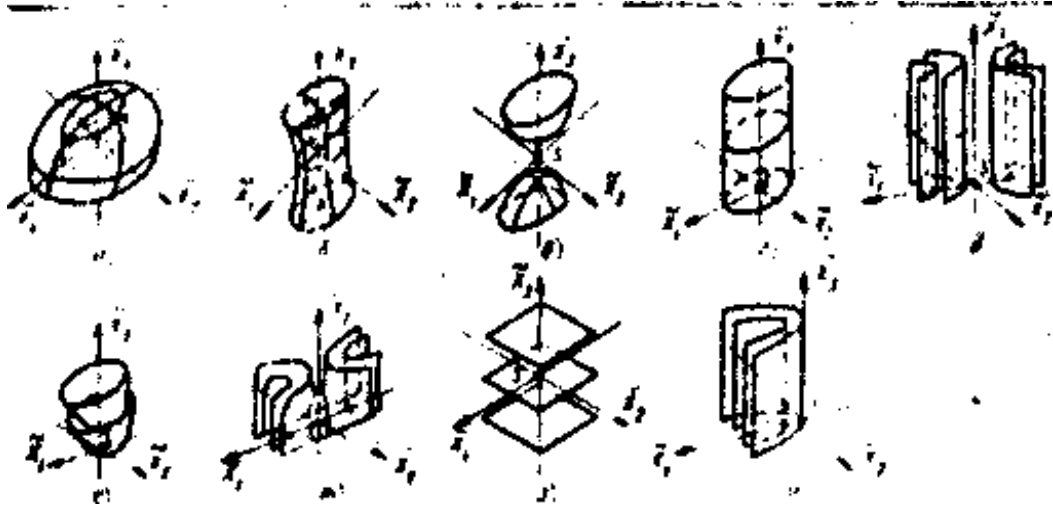


Рисунок 8.2 Поверхности отклика, описываемые квадратичной моделью  $k=3$

При близости одного из коэффициентов канонического уравнения к нулю поверхность отклика может быть либо **эллиптическим цилиндром** (рисунок 8.2, *г*), если остальные два коэффициента имеют **одинаковые знаки**, либо **гиперболическим цилиндром** (рисунок 8.2, *д*), если знаки оставшихся коэффициентов **разные**. В случае **эллиптического цилиндра** ось, соответствующая незначимому коэффициенту, является линией максимума, удаление от которой в любом направлении связано с уменьшением параметра оптимизации (стационарное возвышение).

В этом же случае близости нулю одного из коэффициентов канонического уравнения поверхность отклика может также являться **эллиптическим или гиперболическим параболоидом** (соответственно рисунок 8.2, *е* и *ж*).

В случае **эллиптического параболоида** (рисунок 8.2, *е*) центр фигуры находится в бесконечности. Помещая начало координат в какую-либо новую точку  $s'$  на оси, соответствующей незначимому коэффициенту (например, если  $B_{22}=0$ , то новый центр выбирают на оси  $\tilde{X}_2$ ), можно получить уравнение

$$y - y_s' = B_{11}\tilde{X}_1^2 + B_{33}\tilde{X}_3^2 + B_2\tilde{X}_2$$

коэффициент  $B_2$  которого является мерой наклона возрастающего возвышения по оси  $X_2$ .

Наконец, если два коэффициента канонического уравнения **равны нулю**, то поверхность отклика представляет собой либо серию параллельных плоскостей (рисунок 8.2, *з*), причем одна из этих плоскостей отвечает наибольшей величине параметра оптимизации и с удалением от нее параметр снижается, либо имеет вид параболического цилиндра (рисунок 8.2, *и*).

Итак, все **многомерные поверхности отклика** можно грубо разбить на **три класса**: [8]

1) поверхности, имеющие экстремум - **максимум** или **минимум** (рисунок 8.1, *а*; 8.2, *а*); в этом случае все коэффициенты канонического

уравнения имеют одинаковые знаки, центр фигуры находится вблизи центра эксперимента;

2) поверхности типа **минимакса** (рисунок 8.1,**б**, 8.2, **б,в**); коэффициенты канонического уравнения имеют разные знаки, центр фигуры находится вблизи центра эксперимента;

3) поверхности типа **возрастающего возвышения** или **гребня** (рисунок 8.1, **в**, **г**, 8.2. **г-и**); часть коэффициентов канонического уравнения близка к нулю, центр фигуры удален от центра эксперимента.

В случае поверхностей **первого** класса после постановки опытов в центре (минимуме или максимуме) соответствующей фигуры и получения экспериментальных данных, близких к расчетным, **решение задачи заканчивается.**

Сложнее ситуация, когда поверхность отклика относится ко **второму** и **третьему** классам. Здесь приходится **искать условный экстремум**, причем либо в той области факторного пространства, где проводились эксперименты, либо при некоторой разумной экстраполяции [8].

Расчеты по каноническому анализу квадратичного уравнения обычно выполняют на ЭВМ.

## 9 Определение энергоемкости процесса обработки почвы по понтору залегания корневой системы семечковых деревьев универсальным почвообрабатывающим орудием

### 9.1 Программа и методика экспериментальных исследований

#### 9.1.1 Программа экспериментальных исследований.

Программа экспериментальных исследований состоит из двух полевых опытов включающих этапы:

- оптимизация параметров долота универсального рабочего органа;
- сравнительные испытания с целью определения агротехнических и технико-экономических показателей выполнения технологической операции контурной обработки почвы.

За критерий оптимальности приняты наименьшие показатели тягового сопротивления орудия [16].

На первом этапе исследования решалась задача по оптимизации параметров процесса обработки почвы универсальным рабочим органом, для этого необходимо определить:

- физико-механические свойства агрофона;
- границы расположения корневой системы деревьев в зависимости изменения расстояния от штамба дерева в междурядьях сада;
- оптимальную величину угла крошения долота универсального рабочего органа в процессе безотвальной обработки почвы;
- оптимальную величину длины долота универсального рабочего органа в процессе безотвальной обработки почвы;
- оптимальную величину ширины захвата долота универсального рабочего органа;
- силу сопротивления почвы действующей на универсальный рабочий орган;

На втором этапе исследования решалась задача, связанная с определением эксплуатационных и энергетических показателей, а именно:

- технико-экономических показателей макетного образца и серийной машины для безотвальной обработки почвы;
- оптимальной скорости перемещения агрегата относительно почвы, с целью получения наилучших показателей параметра оптимизации.

#### 9.1.2 Методы исследования агрофона

Методы определения метеорологических условий. Метеорологические условия: температура, относительная влажность воздуха, осадки, скорость

ветра должны быть взяты с метеорологической станции, расположенной вблизи места проведения полевых, эксплуатационных испытаний.

Методы определения характеристики почвы.

Тип почвы и название ее по механическому составу должны быть взяты из почвенной карты хозяйства или района, где проводятся испытания. По величине комков почву делят на фракции согласно ГОСТ 20915-75.

Для учета агрегатного состава почвы по диагонали обработанного участка отбираем совком пять проб почвы, массой не менее 2,5 кг, из слоя толщиной равной глубине хода рабочих органов.

Отобранную пробу почвы высушиваем до воздушно-сухого состояния и просеиваем через набор сит с отверстиями 10; 7,5; 3; 2; 1; 0,5 и 0,25мм без встряхиваний, наклоняя их в разные стороны, постепенно снимая одно за другим, по мере прохода через каждое сито всех мелких почвенных агрегатов. Комки почвы свыше 10 мм с верхнего решета распределяем вручную на три фракции [21, 29].

Таблица 9.1 – Разделение почвы на фракции

Наименование фракции	Размер фракции
Мелкоглыбистая	10,1-50
Глыбистая	50,1-100
Крупноглыбистая	св. 100.

Все фракции взвешиваем и подсчитываем их процент к массе навески.

Пробы на влажность отбираем буром в местах, расположенных по диагонали участка в пятикратной повторности.

Глубину отбора проб устанавливаем равной границам глубины обработки почвы [21]. Влажность почвы определяем по среднему образцу, для чего бур заглубляем на определенную глубину обработки почвы. Вынутый буром образец почвы из данного слоя высыпаем в тару, тщательно перемешиваем почву и отбираем в алюминиевые стаканчики.

Отобранную навеску массой 30 - 40г закрываем плотно крышкой, упаковываем в специальный ящик и отправляем в лабораторию для взвешивания по ГОСТ 20915-75

Абсолютную влажность почвы  $W$  определяем в процентах по формуле

$$W = \frac{a}{b} \cdot 100\%, \quad (9.1)$$

где  $a$  – масса испарившейся воды, г;

$b$  – масса абсолютно сухой почвы, г.

Твердость почвы определяем почвенным твердомером в тех же местах, что и влажность, на одинаковой глубине.



При снятии каждой диаграммы самопишущим твердомером проверяем качество ее записи и исправность работы записывающего устройства. Острие записывающего устройства должно совпадать с нулевой линией. Отклонение не должно превышать  $\pm 1$  мм.

Твердость почвы  $P$  в килограммах на квадратный сантиметр определяем по формуле

$$P = \frac{h_{cp} * q}{S}, \quad (9.2)$$

где  $h_{cp}$  – величина средней ординаты диаграмм твердости,  $см^2$ ;

$q$  – масштаб пружины,  $кг/см^2$ ;

$S$  – площадь поперечного сечения плунжера,  $см^2$ .

$$h_{cp} = \frac{F}{\ell}, \quad (9.3)$$

где  $F$  – площадь диаграммы,  $мм^2$ ;

$\ell$  – длина диаграммы,  $мм$ .

## 9.2 Экспериментальная установка для динамометрирования

9.2.1 Установка для определения горизонтальной составляющей силы сопротивления рабочего органа

Для проведения полевых исследований была изготовлена специальная установка, с помощью которой измеряли величину горизонтальной составляющей силы сопротивления рабочего органа при обработке почвы (рисунок 3.1) [18, 26]. Длину делянки фиксировали колышками (начало и конец) и отмеряли рулеткой расстояние в пятьдесят метров.



Рисунок 9.1 – Установка для определения тягового сопротивления рабочего органа.

Технологическая схема устройства (рисунок 3.2) включает раму 1, на которой посредством кронштейнов 2 установлен рабочий орган 3, закрепленный при помощи подшипника и пальца, соединенный посредством тяг 4 и пальца 5 с динамометром 6, одна сторона которого закреплена пальцем 7 на стойке-упоре 8, и пальцем 9 со стойкой рабочего органа, которая имеет упор-ограничитель 10, фиксирующий стойку рабочего органа в вертикальном положении.

Рабочий орган 3, в свою очередь состоит из стойки, складывающихся полулап (патент РФ №2298302 от 06.06.05) и сменных долот (рисунок 9.2), их конструктивные параметры в таблице 9.2.



Рисунок 9.2 – Сменные долота для проведения полевого опыта.

Таблица 9.2 – Геометрические параметры долота

Угол крошения $\beta$ , град	Ширина долота, мм.	Длина долота, мм.	Угол крошения $\beta$ , град	Ширина долота, мм.	Длина долота, мм.
1	2	3	4	5	6
35	120	180	45	120	80
45	70	180	35	120	80
35	70	180	35	70	80
35	70	80	45	70	180
45	120	180	35	70	180
35	120	180	45	120	80
35	120	80	45	95	130
45	70	80	35	95	130
35	70	80	40	120	130
40	70	130	40	95	130
40	95	180	-	-	-
40	95	80	40	95	130

Устройство работает следующим образом. В процессе обработки почвы агрегируемое транспортное средство перемещает установку. В этот момент происходит заглубление рабочего органа в почву на установленную глубину обработки опорными колесами. Силы сопротивления, действующие на стойку рабочего органа 3, заставляют отклониться ее в сторону, противоположную направлению движения. Стойка рабочего органа через палец 5 тяг 4 действует на динамометр 6, который фиксирует величину действующих сил на рабочий орган 3 и уравнивает её. Перед проведением каждого опыта при помощи тяг 4 устанавливали шкалу динамометра на «0».

### 9.3 Показатели энергетической оценки и методы их определения

#### 9.3.1 Термины и определения

– технологическая операция – направленное воздействие на почву, растение, сельскохозяйственную продукцию и другой технологический материал с целью достижения заранее намеченного изменения их свойств, состояния или формы;

– сельскохозяйственная машина – машина или орудие, осуществляющее воздействие на почву, растение, сельхозпродукцию и другой технологический материал;

– машинотракторный агрегат – сельскохозяйственный агрегат, состоящий из трактора и присоединяемых к нему сельскохозяйственных машин;

– энергетическая оценка: определение затрат энергии, потребляемой сельскохозяйственной машиной или агрегатом на выполнение технологических операций;

– технологический цикл – совокупность циклически повторяющихся и последовательно совершаемых технологических операций [18, 20, 27, 38, 43, 50, 51 53, 54].

#### 9.3.2 Показатели энергетической оценки и методы их определения

Величины, измеряемые при испытании навесных сельскохозяйственных машин и орудий без привода рабочих органов от трактора

– время измерения;

– тяговое сопротивление сельскохозяйственной машины при выполнении технологических операций;

– длину гона.

Допустимые погрешности измерения в процессе проведения экспериментального исследования приведены в таблице 3.4.

Разрешается применять любые многомерные измерительные средства, обладающие заданной суммарной погрешностью и обеспечивающие достоверность измерения [22, 26].

Каждое многомерное средство должно иметь паспорт или иметь отметку о проверке центральной измерительной лаборатории с обязательной датой проведения испытания.

Определение энергоемкости процесса обработки почвы по контуру залегания корневой системы семечковых деревьев универсальным орудием. Энергоемкость процесса обработки почвы по контуру залегания корневой системы плодовых деревьев определим по выражению [38]

$$\mathcal{E}_{\Pi} = \frac{N_{\text{ном.}}}{W_{\text{ч}}}, \quad (9.4)$$

где:  $N_{\text{ном.}}$  – номинальная мощность энергетического средства, кВт;  
 $W_{\text{ч}}$  – производительность машинно-тракторного агрегата за один час работы, га/ч.

Производительность машино-тракторного агрегата зависит от ширины захвата сельскохозяйственного орудия и скорости его перемещения, определяется по выражению [38]

$$W_{\text{ч}} = 0,1B_p V_p \tau, \quad (9.5)$$

где  $B_p$  – рабочая ширина захвата сельскохозяйственного орудия, м;  
 $V_p$  – скорость движения машинно-тракторного агрегата, км/ч.

#### 9.4 Методика обработки экспериментальных данных

При обработке экспериментальных данных необходимо учитывать различные ошибки, которые возникают в процессе получения результатов экспериментальным путем. В силу этого полученные экспериментальные значения измеряемых величин подвергают статистической обработке.

Среднюю арифметическую ошибку вариационного ряда вычисляем по известной формуле [8, 11,12, 14, 15, 26, 31, 42, 44]

$$M = \frac{\sum x}{n}, \quad (9.6)$$

где  $x$  – величина (численные значения) вариационного ряда I-го измерения;  
 $n$ -число измерений.

Средняя арифметическая дает представление о средней величине изучаемого признака. Одновременно для каждого вариационного ряда определяем среднее квадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \alpha_b^2}{n-1}}, \quad (9.7)$$

где  $\alpha_b$  – отклонение варианта от среднего арифметического;  
 $n$  – число измерений.

Для оценки относительной изменчивости результатов измерений используется коэффициент вариации [14, 15]

$$v = \frac{100\sigma}{M}, \quad (9.8)$$

где  $v$ -коэффициент вариации, %.

Ошибку опыта определяем по формуле [8, 11, 12, 14, 15, 26, 31, 42, 44],

$$m = \frac{v}{\sqrt{n}}, \quad (9.9)$$

Показатель точности опыта определяем по выражению [15, 15, 40]

$$P = \frac{100m}{M} \%, \quad (9.10)$$

где  $P$  – показатель точности, %.

9.5 Выбор критерия оптимальности, плана второго порядка и обработка данных планового эксперимента.

В качестве параметров, характеризующих процесс, была выбрана величина тягового усилия, затрачиваемая на преодоление сил сопротивления почвы, действующих на рабочий орган.

Среднюю измерений эмпирического ряда параметров вычисляем по формуле

$$\bar{n} = \frac{\sum x_i n_i}{\sum x_i}, \quad (9.11)$$

где  $\bar{n}$  – среднее значение параметра;  
 $n_i$  – порядковый номер замера;  
 $x_i$  – независимые переменные.

Для отдельной оценки эффектов факторов и их взаимодействия применяли полный факторный эксперимент (ПФЭ) [8, 11, 12, 14, 15, 26, 31, 42, 44], а так как нелинейность модели может быть вызвана не только взаимодействиями между факторами, но и наличием квадратичных членов, составили план 2-го порядка.

Математическая модель второго порядка имеет вид

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2, \quad (9.12)$$

где  $y$  – расчетное значение критерия оптимизации;

$b_{ij}$  – эффекты взаимодействия;

$b_{ii}$  – эффекты при квадратичных членах;

$b_0, b_i$  – при линейных членах;

$x_i, x_j$  – независимые переменные (факторы);

$k$  – количество факторов.

Оценки критериев, связанных с точностью оценок коэффициентов регрессии, являются случайными величинами, и поэтому имеют разброс, который может быть охарактеризован эллипсоидом рассеивания оценок. Ориентировка, форма и объем эллипсоида полностью определяются выбранным планом эксперимента, а именно строением информационной  $M$  и ковариационной  $M^{-1}$  матриц. На основании этого выбрали  $D$ -оптимальный, который приводит к получению эллипсоида рассеяния оценок коэффициентов, минимального объема. В статистическом смысле  $D$ -оптимальность обеспечивает минимум обобщения дисперсий всех оценок коэффициентов и является более полной численной характеристикой по сравнению с другими критериями [14, 15, 40].

В частности, анализ непрерывных симметричных планов второго порядка [11, 12, 14, 15] показал, что максимальное значение определителя информационной матрицы, а потому и  $D$ -оптимальность, достигаются в том случае, когда моменты плана соответственно равны выражениям:

$$\lambda_2 = \frac{k+3}{(k+1)(k+2)} \left[ 1 + (k-1) \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \right] \text{ при } k=1, \quad (9.13)$$

$$\lambda_3 = \frac{2k+1 + \sqrt{4k^2 + 12k + 17}}{4(k+2)} \lambda_2 \text{ при } k > 1 \quad (9.14)$$

$$\lambda_4 = \lambda_2 \quad (9.15)$$

При этом оказалось, что условие выполняется в том случае, когда план содержит только точки с координатами 0 и  $\pm 1$ .

Так были составлены симметричные композиционные планы типа  $B_k$  [11, 12, 14, 15, 41], состоящие как и всякие композиционные планы из ядра и звездных точек, но звездные плечи которых, для выполнения условия (3.18) были приняты  $\alpha=1,0$ . Опыты в центре такие планы не содержат.

При составлении плана 2-го порядка рационально использовать симметричный композиционный план  $B_k$ . Этот план отличается тем, что его ядром является (ПФЭ) – полный факторный эксперимент, а звездные точки равны +1 и -1, а не +1,682 и -1,682, при этом уменьшается количество изготавливаемых для исследования значимых конструктивных элементов и повышается точность факторов на уровнях [14, 15, 41].

Для формализации задачи исследования и использования разработанных матриц планирования, факторы кодировали по выражению [14, 15, 41]

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\Delta}, \quad (9.16)$$

где  $x_i$  – кодированное значение фактора, верхний уровень обозначался +1, нижний – 1, а центр плана 0;

$X_i$  – натуральное значение фактора;

$X_{0i}$  – натуральное значение фактора на нулевом уровне;

$\Delta$  – натуральное значение интервала варьирования.

$$\Delta = \frac{X'_i - X''_i}{2}, \quad (9.17)$$

где  $X'_i$  – натуральное значение фактора на верхнем уровне;

$X''_i$  – натуральное значение фактора на нижнем уровне.

Регрессионный анализ результатов эксперимента проводили на ЭВМ по программе «Определение оптимальных параметров долота универсального рабочего органа» (приложение 5). Перед проведением регрессионного анализа проводили проверку однородности дисперсии по критерию Кохрена [8, 14, 15, 31, 42, 44]. Рассчитанные значения критерия Кохрена  $G$  сравнивали с табличными значениями  $G=0,05$  при 5%-ном уровне значимости и число степени свободы  $f_1=2$  и  $f_2=N$  [41]. При этом значение  $N$  берется равным числу опытов в матрице плана.

При однородности дисперсий рассчитывали коэффициенты регрессии математической модели по результатам опытов плана  $B_k$  используя уравнения [41]. Для оценки адекватности представления результатов эксперимента, его математической модели применяли общую методику, сущность которой может быть представлена так. Остаточная сумма квадратов дисперсий ( $SS_r$ ) при проведении повторяющихся опытов может быть разложена на две суммы – сумму квадратов, определяющую неадекватность результатов эксперимента ( $SS_{if}$ ), и сумму квадратов, связанную с дисперсией, характеризующей ошибку опытов ( $SS_y$ ), т.е.

$$SS_r = SS_{if} + S_y \quad (9.18)$$

где  $SS_r$  – остаточная сумма квадратов дисперсий.

Для проверки адекватности вычисляли критерий Фишера (F) по выражению

$$F = \frac{S_{if}^2}{S_y^2} = \frac{SS_{if}}{f_{if}} \frac{f_y}{SS_y}, \quad (9.19)$$

где  $f_{if}$  и  $f_y$  – соответственно числа степеней свободы, отвечающие сумме  $SS_{if}$  и  $SS_y$ .

Дисперсия неадекватности определяется по выражению

$$S_{\text{if}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k (\hat{y}_u - \bar{y})^2}{N - (k - 1)}, \quad (9.20)$$

где  $\bar{y}$  – среднее значение критерия оптимизации  $u$ -м опыте при  $k$  повторностях;

$k$  – число факторов,  $n=1,2,\dots,i$ ;

$\hat{y}_u$  – значение критерия оптимизации, вычисленное по уравнению регрессии.

Дисперсия, характеризующая ошибку опыта, определялась по формуле

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^w \sum_{i=1}^k (y_{iu} - y_u)^2}{N(k - 1)}, \quad (9.21)$$

где  $S_y^2$  – дисперсия опыта;

$y_{iu}$  – значение критерия оптимизации в параллельных опытах.

После получения адекватной математической модели второго порядка определяем координаты оптимума и изучаем свойства поверхности отклика в окрестностях оптимума.

Для анализа и систематизации уравнения второго порядка приводим к типовой канонической форме вида:

$$Y - Y_s = B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + \dots + B_{nn}X_n^2, \quad (9.22)$$

где  $Y$  – значение критерия оптимизации;

$Y_s$  – значение критерия оптимизации в оптимальной точке;

$X_1, X_2, \dots, X_n$  – новые оси координат, повернутые относительно сторон

$X_1, X_2, \dots, X_n$ ;

$B_1, B_2, \dots, B_{nn}$  – коэффициент регрессии в канонической форме.

При каноническом преобразовании уравнения второго порядка [11, 12, 14, 15, 41] производился перенос начала координат в новую точку пространства  $S$  и поворот первоначальных осей на некоторый угол в факторном пространстве. Для этого продифференцировали функцию отклика по каждой переменной и, приравняв к нулю частые производные, получали серию изолиний на плоскости, на основании которых производился анализ уравнения регрессии [41].

После канонического преобразования и определения вида поверхности отклика проводили анализ с помощью двухмерных сечений.

Для этого в модель подставляем нормализованные значения всех факторов кроме двух. В полученном выражении определяем центр



поверхности отклика, путем взятия частных производных по каждому фактору и приравнивания полученных выражений к нулю. Строим полученную поверхность [8, 11, 12, 14, 15, 26, 31, 42, 44]. Придаем различные значения критерию оптимизации ограниченных интервалом варьирования, строим серию кривых равного выхода (изолиний) в области допустимых значений независимых переменных. По кривым сечений судим об изменении величины критерия оптимизации в зависимости от натуральных значений. Таким образом, выбираем параметры характеризующие процесс контурной обработки почвы и рассматриваем математические выражения для их вычисления.

Рассмотрели методику обработки экспериментальных данных (регрессионного анализа) при использовании матриц симметричного композиционного плана типа  $B_k$ .

#### 9.6 Частная методика проверки на адекватность аналитической зависимости по критерию Кохрена

Проверку адекватности аналитической зависимости проводим наложением ее на полученную методом планирования эксперимента и аппроксимирования экспериментальную функцию.

Для этого в аналитическую зависимость подставляем оптимальные значения параметров трёх факторов, а четвертый изменяем в пределах интервала варьирования. Проводим расчеты и получаем параметрическую кривую в декартовой системе координат, где по оси ( $y$ ) – расположен отклик, а по ( $x$ ) – варьируемый фактор.

Аналогично определяем параметрическую кривую экспериментальной функции и строим ее в той же декартовой системе координат.

Определяем коэффициент перехода [34] от аналитической зависимости к экспериментальной аппроксимированной модели по разработанной нами программе для ПЭВМ (приложение D).

Необходимым условием при подборе коэффициента перехода функций является определение минимальной суммы, квадрата разности отклонений (

$\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2 - \min$ ), а разность отклонений определяем по выражению,

$$S_y = F_T(x) - F_3(x), \quad (9.23)$$

где  $F_T(x)$  –  $F_3(x)$  – соответственно аналитическая зависимость и экспериментальная модель.

Изменяем, коэффициент перехода до тех пор, пока сумма квадрата разности отклонений функций, примет минимальное значение, близкое к «0».

После выполнения заданного условия проверяем на адекватность аналитическую зависимость по критерию Кохрена [14, 15, 41]. Аналитическая зависимость адекватна, если выполняется условие,

$$G_{расч} \leq G_{таб}, \quad (9.24)$$

Определяем расчетный критерий Кохрена ( $G_{расч}$ ) по выражению,

$$G_{расч} = \frac{S_{y_u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2}, \quad (9.25)$$

где  $S_{y_u \max}^2$  – квадрат разности максимального отклонения,

$\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2$  – сумма, квадрата разности отклонений.

Определяем величину степени свободы по выражению,

$$f = N - 1, \quad (9.26)$$

$$\text{где, } N = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\Delta} + 1, \quad (9.27)$$

где  $x_{\max}$  – максимальное значение абсциссы;

$x_{\min}$  – минимальное значение абсциссы;

$\Delta$  – величина шага изменения абсциссы;

$f$  – степень свободы.

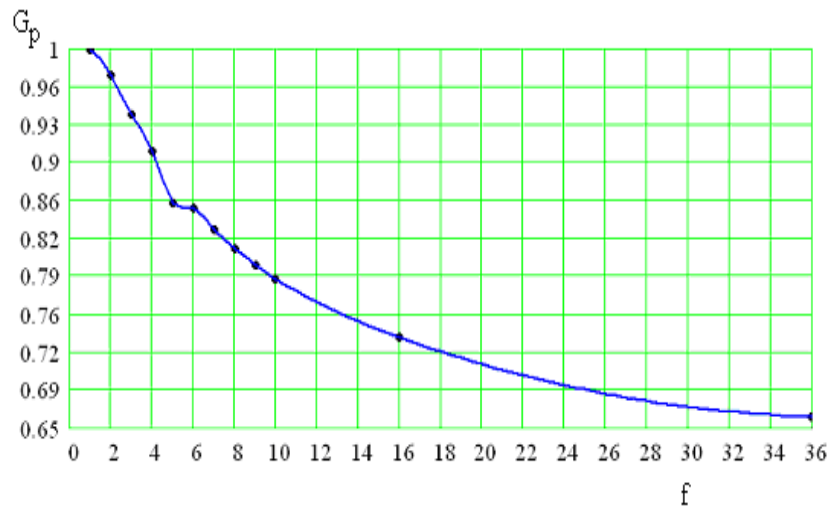


Рисунок 9.3 – Кубический сплайн коэффициента Кохрена

При этом должно выполняться условие  $\frac{x_{\max} - x_{\min}}{\Delta} + 1$  равно целому числу. Полученную величину расчетного критерия ( $G_{расч}$ ), сравниваем с табличным значением коэффициента Кохрена, выбранного по таблице приложения VI [14] или кубическому сплайну (рисунок 9.3) при уровне значимости  $\alpha=0,05$  и рассчитанной степени свободы  $f$ .

Функция адекватна, если выполняются условие (9.27). В противном случае необходимо изменить коэффициент перехода или определить ошибку аналитической зависимости. Могут оказывать влияние неучтенные динамические факторы.

## 9.7 Результаты экспериментальных исследований

Лабораторно-полевые испытания проводили на территории «Открытого акционерного общества коллективного сельскохозяйственного предприятия «Светлогорское» Абинского района Краснодарского края. Для проведения эксперимента опытные делянки выделяли на площади с посадками многолетних насаждений 13 квартал, сорт «Прима» подвой ММ 106. Система содержания комбинированная, в первом междурядье дерново-перегнойная, во втором – черный пар

### 9.7.1 Исследования агрофона

Определение метеорологических условий. Метеорологические условия: температура, относительная влажность воздуха, осадки, скорость ветра определяла метеорологическая станция, расположенная в поселке Светлогорский, Абинского района. Метеорологическая станция находится в непосредственной близости от места проведения полевых испытаний. Зафиксировали следующие показатели:

– осадков нет;

– среднесуточная температура  $t_{\max} = 36,7^{\circ}$   $t_{\min} = 18,3^{\circ}$

Определение характеристики почвы. По природно-сельскохозяйственному районированию земельного фонда России территория хозяйства относится к степной и лесостепной зоне, предкавказской лесостепной провинции, расположенной на карте хозяйства под номером 131, (рисунок 9.4).

По мощности гумусовых горизонтов и степени эродированности дерново-карбонатные почвы отнесены к мощным слабосмытым (А+В колеблется от 61 до 66 см), среднемощным слабосмытым слаборазмываемым и слаборазмытым (А + В колеблется 42...57 см), маломощным сильносмытым слаборазмытым (А + В составляет 28см).

По степени выщелоченности дерново-карбонатные почвы делятся на типичные (вскипание от действия 10% соляной кислоты отмечается по всему профилю) и выщелоченные (вскипание ниже гумусового профиля).



Рисунок 9.4. – Карта расположения почв хозяйства по природно-сельскохозяйственному использованию

По величине комков почву делили на фракции по ГОСТ 20915-75.

Для учета агрегатного состава почвы по диагонали обработанного участка взяли совком пять проб почвы массой по 2,5 кг из слоя толщиной 20 см равного глубине хода рабочих органов, сортировали почву на решетках, получили результаты, таблица 1,2 приложение В.

Определение влажности почвы. Отбор проб почвы для определения абсолютной влажности  $W$  проводили по ГОСТ 20915-75. Обработку данных проводили по разработанной программе в среде «MathCAD», для операционных систем Windows XP, Windows-2000. Определили закономерность изменения влажности (рисунок 9.5), в зависимости от глубины залегания исследуемого уровня, получено уравнение регрессии

$$W(x) = \frac{18,979 \cdot 10^3}{e^x} + 21,741 \cdot 10^{-9} - 4,14 \cdot 10^{-3} x, \quad (9.28)$$

По разработанной программе проводили вычисления и получили параметры влажности при проведении полевого опыта.

Аналогично рассчитывали значение влажности весовой по всему периоду испытаний  $W = 5,8 \%$ ,  $V = 10,54 \%$  – с коэффициентом вариации, среднеквадратичное и максимальное отклонение  $SS = 1,0849$  и  $S = 0,612$  и средняя относительная ошибка выборки  $S_{xp} = 1,924 \%$ .

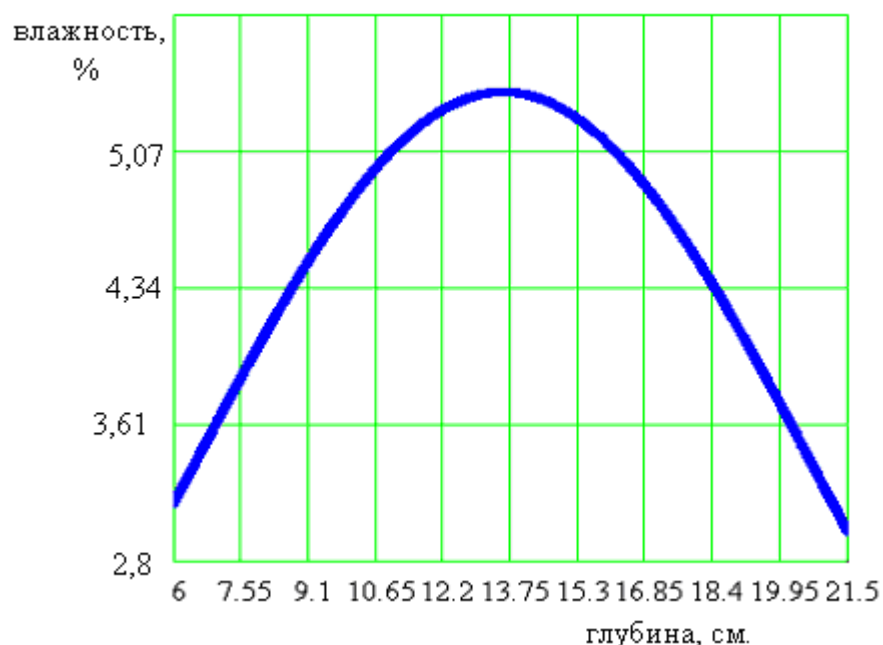


Рисунок 9.5 – Закономерность изменения влажности в зависимости от глубины исследуемого уровня.

Определение твердости почвы. Твердость почвы определяли почвенным твердомером в тех же местах, что и влажность, на одинаковой глубине по ГОСТ 20915-75.

Твердость почвы  $P$  в килограммах на квадратный сантиметр определяли по формуле

$$P = \frac{h_{cp} * q}{S}, \quad (9.29)$$

где  $h_{cp}$  – величина средней ординаты диаграмм твердости,  $см^2$ ;

$q$  – масштаб пружины,  $кг/см^2$ ;

$S$  – площадь поперечного сечения плунжера,  $см^2$ .

Среднюю ординату определяли методом планиметрирования диаграммы и подсчитывали по формуле

$$h_{cp} = \frac{F}{\ell}, \quad (9.30)$$

где  $F$  – площадь диаграммы,  $мм^2$ ;

$\ell$  – длина диаграммы,  $мм$ ,

Обработали полученные результаты по разработанной программе в среде «MathCAD», для операционных систем Windows XP, Windows-2000, определили закономерность изменения твердости почвы (рисунок 9.6) в зависимости от глубины залегания исследуемого уровня, получили уравнение регрессии

$$P(x) = \frac{1}{-348,74 \cdot 10^{-3} x^2 + 9,7844 \cdot 10^{-3} e^x + 1,5185 x}, \quad (9.31)$$

По разработанной программе проводили вычисления и получили параметры твердости почвы на момент полевых испытаний  $P = 15,8$  кПа,  $V = 13,189$  % – коэффициент вариации, среднее квадратичное и максимальное отклонение соответственно  $SS = 70,933$  и  $S = 2,251$ , средняя относительная ошибка выборки  $S_{xp} = 3,405$  %.

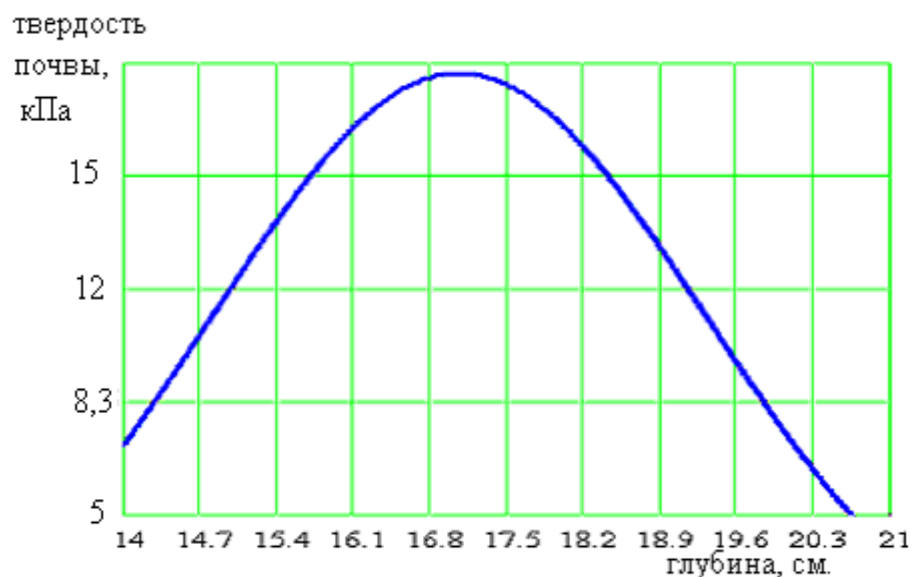


Рисунок 9.6 – Закономерность изменения твердости почвы в зависимости от глубины исследуемого горизонта.

Для горизонта 30...40 см значение твердости определяли аналогично, т.е. на данной глубине взяли пробы почвенным твердомером.

После планиметрирования диаграммы, получили результаты  $P = 24.733$  (средняя),  $V = 22,587$  % – коэффициент вариации,  $SS = 436,93,933$  и  $S = 5,587$  – среднее квадратичное и максимальное отклонение, средняя относительная ошибка выборки  $S_{xp} = 5,832$  %  $S_x = 1,44244$

Определение плотности почвы  $\rho$ . Плотность почвы определяли по формуле

$$\rho = \frac{b}{V}, \quad (9.32)$$

где  $b$  – масса абсолютно сухой почвы со всего бура, г;  
 $V$  – объем образца взятой почвы, см<sup>3</sup>.

Глубину определения плотности почвы установили такую же, как и при отборе проб для измерения влажности и твердости. Пробы для определения плотности почвы отбирали и определяли по ГОСТ 20915-75.

Обработали данные по разработанной программе в среде «MathCAD», для операционных систем Windows XP, Windows-2000, определили закономерность изменения плотности почвы (рисунок 9.7), в зависимости от глубины залегания исследуемого уровня

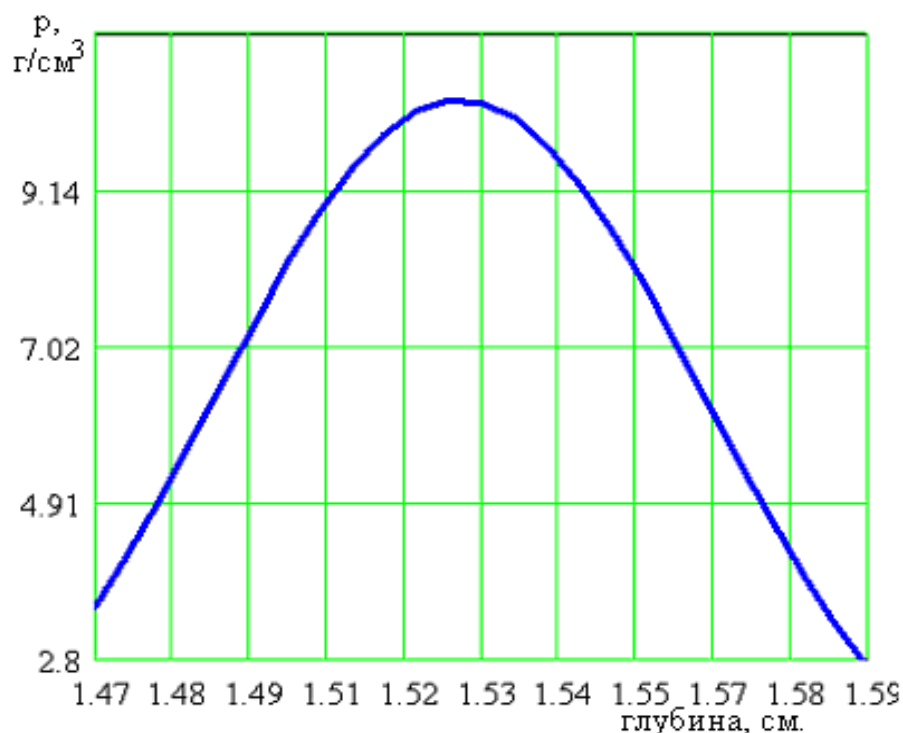


Рисунок 9.7 – Закон изменения плотности почвы в зависимости от глубины залегания исследуемого горизонта.

Получили уравнение регрессии, по которому определяли плотность почвы на заданной глубине исследования.

$$\rho(x) = \frac{-33940}{e^x} + \frac{14230}{x} - 1274x \quad (9.33)$$

По разработанной программе проводили вычисления и получили параметры плотности почвы при проведении лабораторно полевых испытаний  $\rho = 1,582 \text{ г/см}^3$ ,  $V = 3,133 \%$  – коэффициент вариации, среднеквадратичное и максимальное отклонение  $SS = 60,394$  и  $S = 0,17893$  – относительная ошибка выборочной средней  $S_{xp} = 0,809 \%$ .

Определение глубины залегания корневой системы плодовых деревьев. При выборе схемы расстановки рабочих органов универсального орудия (патент RU № 2298302, 06.06.2005) определяли глубину залегания корневой системы семечковых деревьев. Для этого разделили на горизонты глубину залегания корневой системы в зависимости удаления от штамба дерева, получили A – 1 м, B – 1...1,5 м, C – 1,5...2,5 м, D – 2,5...3 м, расположенные соответственно на глубине 7...12 см, 12...25 см, 25...30 см, 30...45 см [7, 23, 43, 44, 48, 49, 54, 57, 60, 63, 67, 69, 73, 74, 85, 86, 88, 98, 99, 113].

Обработали данные, полученные с целью физиологического и экологического анализа факторов, определяющих корнеобразование, методами «монолита», «скелета» и «среза» (профиля) в модификации П. Г. Шитта (1936), В.А. Колесникова (1962), А. П. Драгавцева (1956) и В. И.

Будаговского (1959) на территории «Сад-Гигант» Славянского района Краснодарского края, на сортах Делишес, Голден Делишес клон «Б», Ренет Семиренко подвоях ММ – 106, М – 109, М – 3, М – 9, М – 26 при разных схемах посадки и почвах [32] по разработанной программе для ПЭВМ "Анализ глубины залегания корневой системы в зависимости удаления от штамба плодовых, многолетних семечковых насаждений, получили следующее:

1) Корнеобитаемый слой определяется глубиной 8,2 см с вероятностью 16% от общего количества корней и относительной ошибкой выборочной средней 5,48 % .

2) Гистограмма эмпирического распределения корневой системы по глубине в горизонте «А» приведена на рисунке 9.8

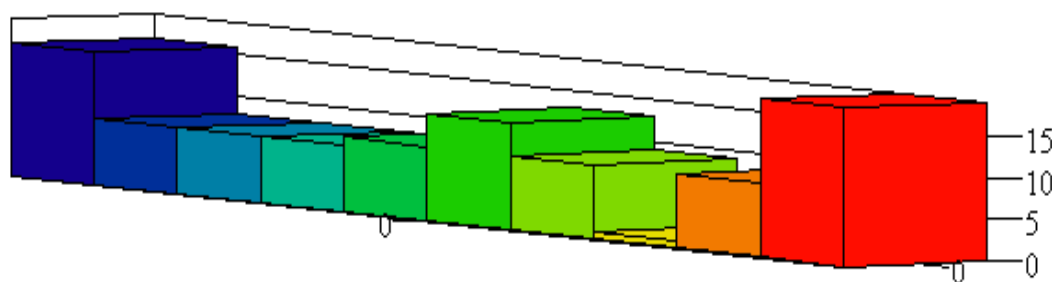


Рисунок 9.8 – Гистограмма эмпирического распределения корневой системы плодовых деревьев по глубине залегания

3) Полигон эмпирического распределения корневой системы по глубине залегания в горизонте «А» приведен на рисунке 9.9;

4) Распределение корней по глубине залегания в горизонте «А» подчиняется закону нормального распределения (рисунок 9.10),

5) Получили и проверили на адекватность по критерию Кохрена уравнение (9.34), полученное методом аппроксимации.

#### 9.7.2 Определение удельного сопротивления почвы.

Для расчета удельного сопротивления почвы обработке, нами разработана программа в среде MathCAD, по которой определяем величину удельного сопротивления почвы, при влажности не более 6,3%. Составлена номограмма для определения УСП (рисунок 9.12) в зависимости от удельной поверхности и плотности сложения почвы.



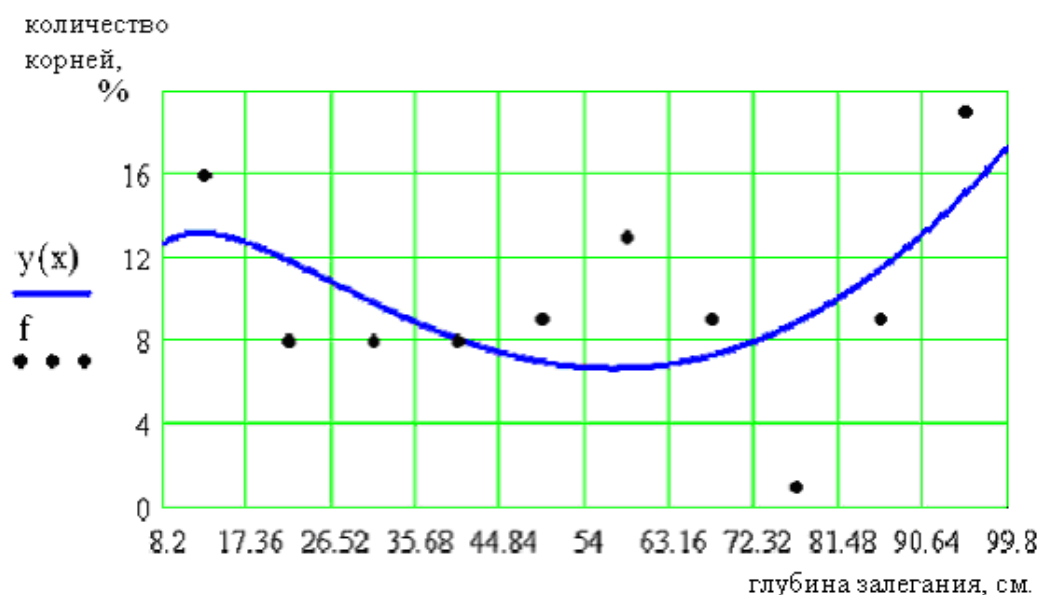


Рисунок 9.9 – Полигон эмпирического распределения корневой системы по глубине исследуемого горизонта

$$S(x) = 6,784x^2 \cdot 10^{-3} + 9,4576 \cdot \ln(x) - 940,31x \cdot 10^{-3} \quad (9.34)$$

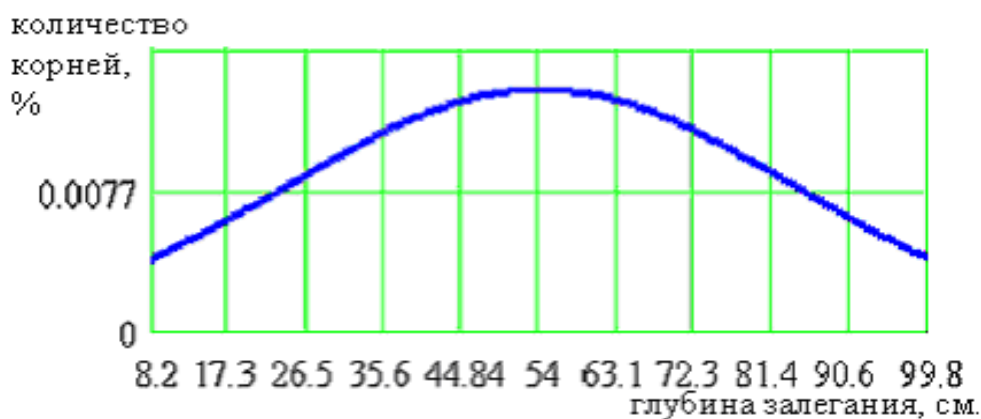


Рисунок 9.10 – Закон нормального распределения

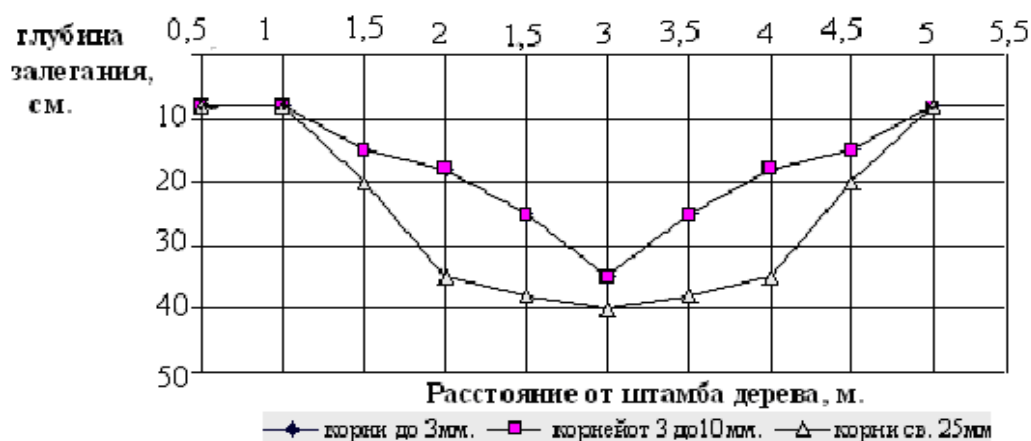
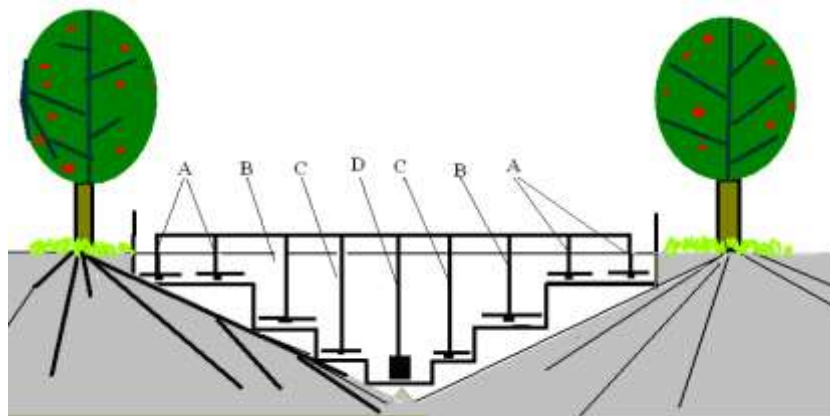


Рисунок 9.11 – Глубина залегания корневой системы деревьев в зависимости удаления от штамба в междурядьях плодоносящего сада

Результаты расчетов (расположения корневой системы плодовых деревьев) по горизонтам А, В, С, D приведены таблице рисунка 9.12.



Расстояние от штамба дерева, м.*				
Глубина обработки почвы, см.	до 1,5	От 1,5 до 2	От 2 до 2,5	От 2,5 до 3
		8	15	18

\*Расчетная схема расстановки рабочих органов применима для схем посадок с шириной междурядья 6 м и защитной зоной до 40 см

Рисунок 9.12 – Схема расстановки рабочих органов универсального орудия

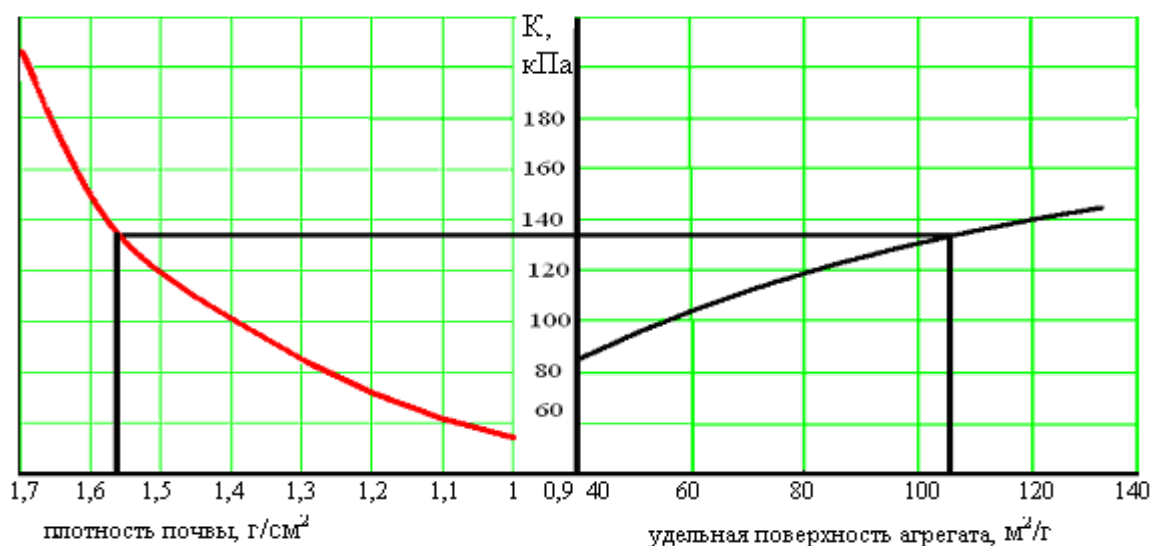


Рисунок 9.13 – Номограмма для определения удельного сопротивления почвы в зависимости от удельной поверхности и плотности сложения

Согласно номограмме, удельное сопротивление бурой лесной почвы плотность сложения которой  $j = 1,58 \text{ г/см}^3$  и удельная поверхность почвенного агрегата  $S = 103 \text{ м}^2/\text{г}$ , составляет  $K = 138 \text{ кПа}$ .

2) Величина удельного сопротивления почвы, полученная расчетным методом, близка величине полученной в ходе специального эксперимента, проведенного в ОАО КСП «Светлогорское» Абинского района Краснодарского края на бурых лесных почвах, что свидетельствует о применимости предлагаемого нами метода

9.7.3 Определение энергоёмкости технологической операции обработки почвы по контуру залегания корневой системы семечковых деревьев в междурядьях сада.

Энергоёмкость процесса обработки почвы по контуру залегания корневой системы семечковых деревьев в междурядьях сада, в зависимости от рабочей скорости перемещения машинно-тракторного агрегата, определена методом аппроксимации. В нашем случае оптимальная скорость машино-тракторного агрегата определяется расчетной величиной 4,65 км/ч, что не возможно обеспечить технически, поэтому принят интервал 4...5 км/ч.

Графическую зависимость энергоёмкости процесса построили по двум точкам, которым соответствуют скорость перемещения 4 и 5 км/ч (рисунок 9.14). Определили величину энергоёмкости процесса при расчетной рабочей скорости 4,65 км/ч, величина ее составляет 94,91 мДж/га.

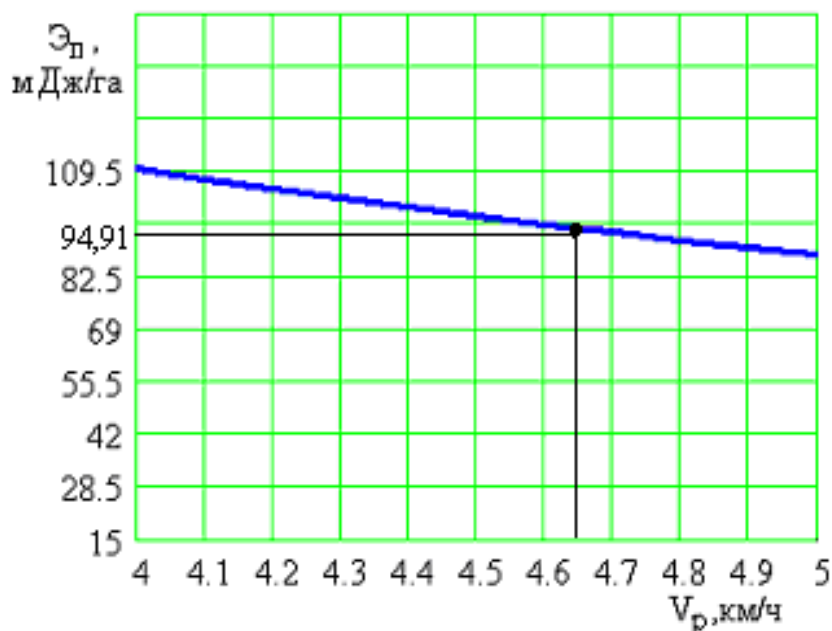


Рисунок 9.14 – Зависимость энергоёмкости процесса обработка почвы от скорости перемещения

Зависимость энергоёмкости процесса обработки почвы по контуру залегания корневой системы в междурядьях семечкового сада от рабочей скорости движения получили в виде уравнения следующего вида,

$$y(x) = \frac{1}{\frac{62.339 \cdot 10^{-6}}{e^x} + 2,265 \cdot 10^{-3} \cdot x}, \quad (9.35)$$

Энергоемкость базовой технологической операции определена аналогично, величина которой на 50,1% больше, чем предлагаемого варианта и составляет 142,452 мДж/га.

### 9.7.3 Оптимизация параметров рабочего органа для обработки почвы

При рассмотрении факторов влияющих на изменение тягового сопротивления почвы, учитывали их геометрические размеры и расположение в пространстве относительно друг друга. Анализ непрерывных, симметричных планов второго порядка показал, что максимальное значение определителя информационной матрицы достигается в том случае, когда моменты плана соответственно равны [14, 15, 41, 42].

Для этого использовали симметричный композиционный план типа  $V_k$  (звездные точки которого равны  $\pm 1$ ). Изучали влияние четырех факторов и фиксировали их значения на оптимальных уровнях. Факторы, интервалы и уровни варьирования представлены в таблице 9.3 .

Таблица 9.3 – Факторы, интервалы и уровни варьирования

Факторы	Кодированные обозначения	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			-1	0	+1
Угол крошения $\beta$ , град.	$x_1$	5	35	40	45
Ширина долота (b), м.	$x_2$	0,02	0,07	0,09	0,110
Длина долота $\ell$ , м.	$x_3$	0,05	0,08	0,130	0,180
Скорость, км/ч.	$x_4$	2	4	6	8

На энергоёмкость процесса обработки почвы влияют, скорость перемещения орудия, углы крошения и угол раствора  $2\gamma$  долота, плоскорезной лапы, борошителей и стойки [17, 20, 23, 24, 25, 28, 33, 36, 37, 39, 45, 46, 49, 52].

Однако угол крошения и угол раствора плоскорезной лапы, стойки и борошителей в этой работе не рассматриваются, т.к. для эксперимента выбраны параметры элементов серийного производства [17, 20]. Уровни факторов выбирали таким образом, чтобы оптимальные их значения, рассчитанные теоретически или учитывающие существующие ограничения, попадали в центр интервала варьирования [14, 15, 41].

Значением для первого фактора  $x_1$  является угол крошения долота, интервал варьирования которого составил десять градусов, от  $\beta_{\min} = 35^\circ$ , до  $\beta_{\max} = 45^\circ$  максимальная величина.

Для второго фактора  $x_2$  является ширина долота, интервал размеров 0,07...0,12 м, что соответствует интервалу варьирования.

Максимальным и минимальным значением для третьего фактора  $x_3$  была принята длина рабочей поверхности долота от 0,18...0,08 м, при этом высота долота не фиксировалась, т. к. эти величины зависимы от рабочей длины долота  $l$  и как фактор варьирования нами не рассматривались.

Для четвертого фактора  $x_4$  скорости перемещения рабочего органа, принят интервал варьирования от 4...8 км/ч [18, 35, 41, 47].

Значения первого, второго и третьего фактора фиксировали изготовлением долот. Изготовлено 24 долота, геометрические размеры которых изменялись по плану эксперимента.

Смена долота (рисунок 9.15) проводилась по разработанному плану случайных чисел, четвертый фактор фиксировался установкой СКРТ 31 Лайт ВТ установленной на трактор МТЗ-82 внутривладельческий номер 3. при помощи GPS и космического спутника. Изменение величины скорости перемещения агрегата в течение опыта, фиксировалось в блоке памяти прибора, и результат представлялся в виде графической зависимости, который обрабатывали методом планиметрии ординат.



Рисунок 9.15 – Смена долота универсального рабочего органа для обработки почвы в процессе эксперимента

Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 9.4. Опыты проводили согласно описанной методике в третьем разделе.

Для этого по междурядьям сада отмеряли расстояние 60 м и фиксировали длину участка колышками (в начале и в конце). Устанавливали

долото в зависимости от уровня варьирования исследуемых факторов на основании плана эксперимента (таблица 9.4). Устанавливали динамометр на начало отсчета и фиксировали стойку рабочего органа в вертикальном положении.

Таблица 9.4 – Матрица планирования эксперимента при оптимизации параметров универсального рабочего органа

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_1x_4$	$x_2x_3$	$x_2x_4$	$x_3x_4$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$	$x_4^2$	Откли к, Н
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2456
-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	2134
+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	2452
-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	2159
+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+	2454

Продолжение таблицы 9.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
-	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	2138
+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	2358
-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	2071
+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	2019
-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	2039
+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	+	2068
-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+	2117
+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	2049
-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	2076
+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	2006
-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2061
+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	2182
-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	1995
0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	2088
0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	2078
0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	2098
0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	2069
0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	2304
0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	2081

Показания динамометра в процессе опыта фиксировали при установившемся движении машинотракторного агрегата фотокамерой ДМС-LS70 в режиме кинокамеры со скоростью 30 кадров в секунду. Получили результаты съемки, обработали при помощи программы Quik Time Player на персональном компьютере ПО Windows XP. Из полученных результатов составили вариационный ряд и обработали методом математической статистики по разработанной программе. Порядок проведения опытов выполняли согласно таблице случайных чисел. Результаты экспериментальных исследований по определению оптимальных геометрических параметров долота рабочего органа обработали по известным методикам [14, 41].

#### 9.7.4 Анализ тягового сопротивления рабочего органа универсального орудия для обработки почвы

В результате математической обработки экспериментальных данных получили математическую модель в виде уравнения регрессии второго порядка,

$$Y = 2085 + 6.67 x_1 + 0.46 x_2 + 1.45 x_3 + 11.15 x_4 + 0.72 x_1 x_2 + 0.166 x_1 x_3 + 8.55 x_1 x_4 - 2.3 x_2 x_3 + 1.31 x_2 x_4 + 0.79 x_3 x_4 - 2.35 x_1^2 - 0.18 x_2^2 - 0.129 x_3^2 + 10.75 x_4^2, \quad (9.36)$$

где  $Y$  – величина тягового сопротивления рабочего органа, Н.

Продифференцировали уравнение (9.36) по каждой из переменных и приравнивали производные к нулю, получили систему линейных уравнений, состоящую из 4-ех уравнений.

Решили систему линейных уравнений, определили новые координаты центра поверхности отклика  $x_1 = 0,29$ ,  $x_2 = 0,443$ ,  $x_3 = -0,152$ ,  $x_4 = -0,655$ .

Подставили в исходное уравнение (4.9) значения  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  определили значение параметра оптимизации в центре поверхности отклика, при этом получили величину параметра оптимизации,  $Y_s = 2085$  Н,

Определили угол поворота начальных осей координат до совмещения с новыми осями поверхности отклика, угол поворота осей  $\alpha$  равен  $44,5^\circ$ .

Квадратичное уравнение регрессии в канонической форме будет иметь вид согласно [8, 11, 12, 14, 15, 41]

$$Y - 2085 = -2.35 X_1^2 - 1.305 X_2^2 + 0.996 X_3^2 + 10.75 X_4^2, \quad (9.37)$$

или:

$$\frac{(X_1)^2}{Y - 2085} + \frac{(X_2)^2}{Y - 2085} + \frac{(X_3)^2}{Y - 2085} + \frac{X_4^2}{Y - 2085} = 1, \quad (9.38)$$

$$\frac{\phantom{(X_1)^2}}{-2,35} + \frac{\phantom{(X_2)^2}}{-1,305} + \frac{\phantom{(X_3)^2}}{0,996} + \frac{\phantom{X_4^2}}{10.75} = 1,$$

Удобство формы (9.37) для анализа и оптимизации заключается в том, что все  $(X_i)$  входят в это выражение в квадратах, следовательно, и изменения отклика зависят только от коэффициента и не зависят от направления по оси  $(X_i)$  от центра координат. Чтобы получить представление о поверхности отклика рассмотрим ее при помощи двухмерных сечений.

Рассмотрим сечение плоскостью  $X_1 S X_4$ . Для этого в исходное уравнение (9.36) подставили  $x_2=0,443$  и  $x_3 = -0,152$  т.е. приняли их за центр плана, уравнение принимает вид

$$Y_{14}=2085+6,963 x_1+11,730 x_4+8,55 x_1 x_4-2,35 x_1^2+10,75 x_4^2 \quad (4.39)$$

где  $Y_{14}$  – тяговое сопротивление рабочего органа, при варьировании факторов  $x_1$  и  $x_4$ , 2-й и 3-й фактор закреплены в центре плана.

Выполнили каноническое преобразование и решили систему линейных уравнений, определили координаты центра поверхности отклика

$$x_1 = 0,29, \quad x_4 = -0,655$$

Подставили найденные значения в уравнение (9.40). Определили параметры оптимизации в центре поверхности отклика,  $x_2 = 0,443$  и  $x_3 = -0,152$ , при этом величина отклика составила  $Y_{S_{14}} = 2085$ Н. Угол поворота новых осей  $\alpha$  в факторном пространстве относительно начальных равен минус 6,655 градусов, а коэффициенты уравнения в канонической форме имеют значения  $B_{11} = -3,622$ ;  $B_{44} = 12,022$ .

Уравнение регрессии в канонической форме имеет вид,

$$Y_{14} - 2085 = -3,622X_1^2 + 12,022X_2^2, \quad (9.40)$$

Поверхность отклика – гиперболоид (рисунок 9.15), а ее центр - минимум, поскольку коэффициенты  $B_{11} = -3,622$  и  $B_{44} = 12,022$  имеют разные знаки. Гиперболы вытянуты по той оси, которой соответствует меньшее по абсолютной величине значение коэффициента в каноническом уравнении (9.40). В этом случае, увеличение скорости перемещения рабочего органа оказывает большее влияние на величину отклика, чем увеличение угла крошения долота.

Однако оптимальные величины варьируемых факторов находятся в центре поверхности отклика, при этом факторы  $x_2$  и  $x_3$  остаются фиксированными в центре плана.

Анализировали сечение поверхности отклика  $X_1 S X_2$ , т.е. влияние интервалов варьирования факторов  $x_1$ (угол крошения долота) и  $x_2$  (ширина рабочей части долота) на величину отклика, при постоянных  $x_4$  и  $x_3$ . Для этого в исходное уравнение (9.12) подставили фиксированные значения центра плана  $x_4 = -0,655$  и  $x_3 = -0,152$ . Уравнение принимает вид:

$$Y_{12}=2056+1,05x_1-0,048x_2+0,72x_1x_2-2,35x_1^2-0,18x_2^2, \quad (9.41)$$



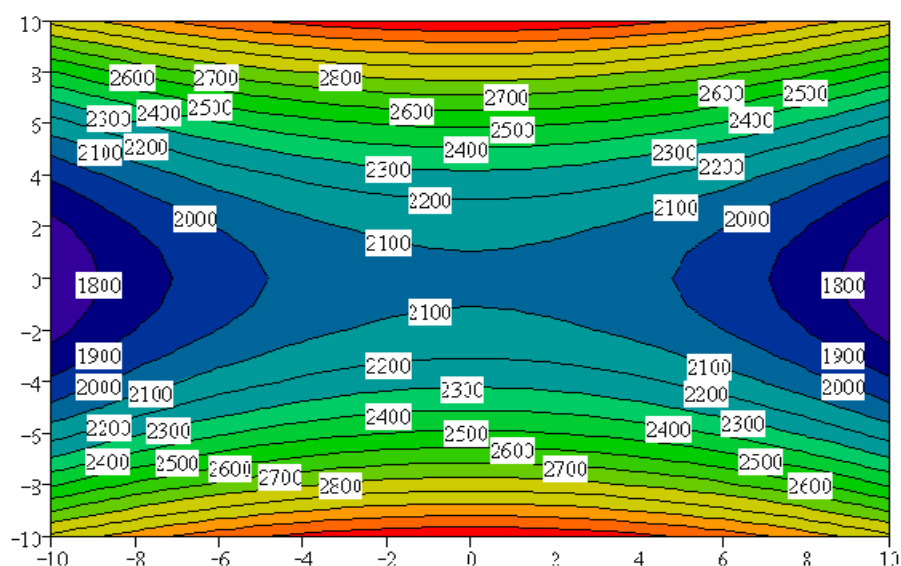
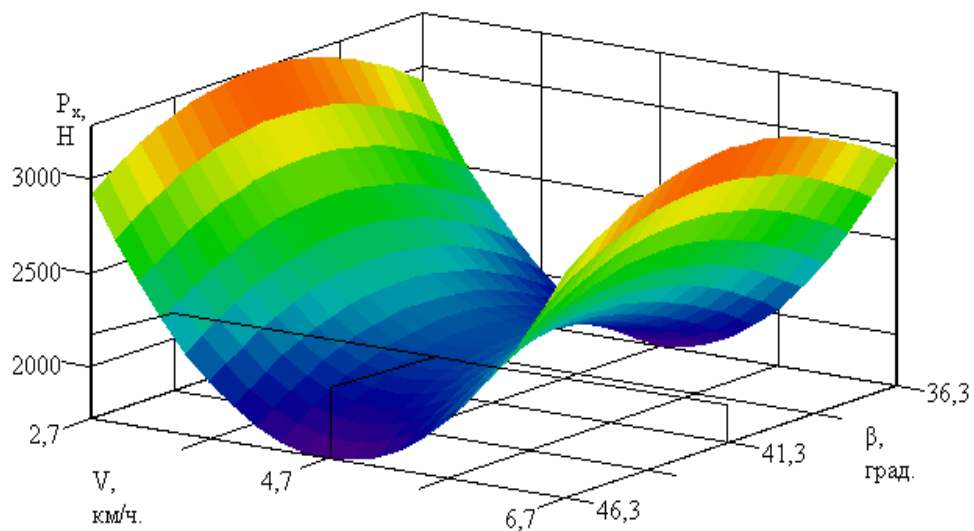


Рисунок 9.16 – Поверхность зависимости тягового сопротивления универсального рабочего органа от угла крошения долота и скорости движения

Выполнили канонические преобразования, решили систему линейных уравнений, получили координаты центра поверхности отклика (рисунок 9.11)  $x_1 = 0,29$ ,  $x_2 = 0,433$ .

Подставили найденное значение  $x_1$  и  $x_2$  в уравнение (9.41) и определили значение параметра оптимизации в центре поверхности отклика, когда остальные факторы фиксированы соответственно в точках центра поверхности отклика  $x_2 = 0,443$  и  $x_1 = 0,290$ , получили значение отклика  $Y_{s12} = 2085$  Н. Угол поворота новых осей  $\alpha$  в факторном пространстве относительно начальных равен минус 9,178 градусов, а коэффициенты регрессии в канонической форме соответственно равны:  $B_{11} = -2,408$ ,  $B_{22} = -0,122$ .

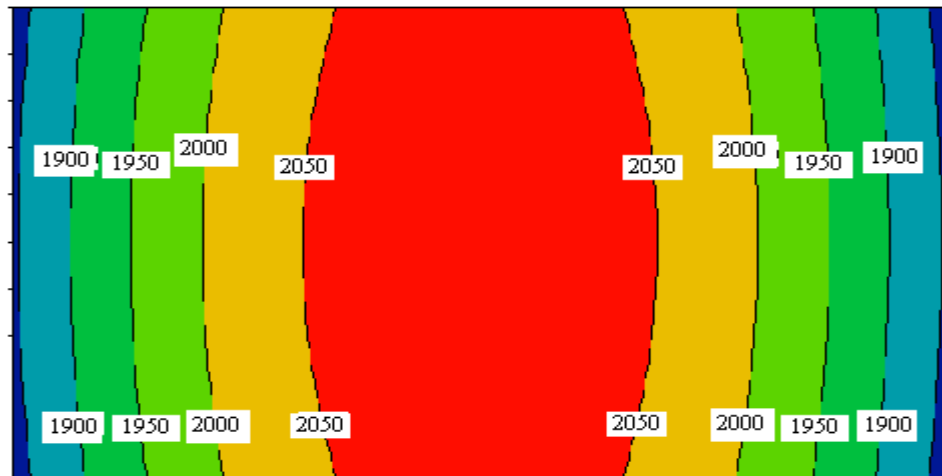
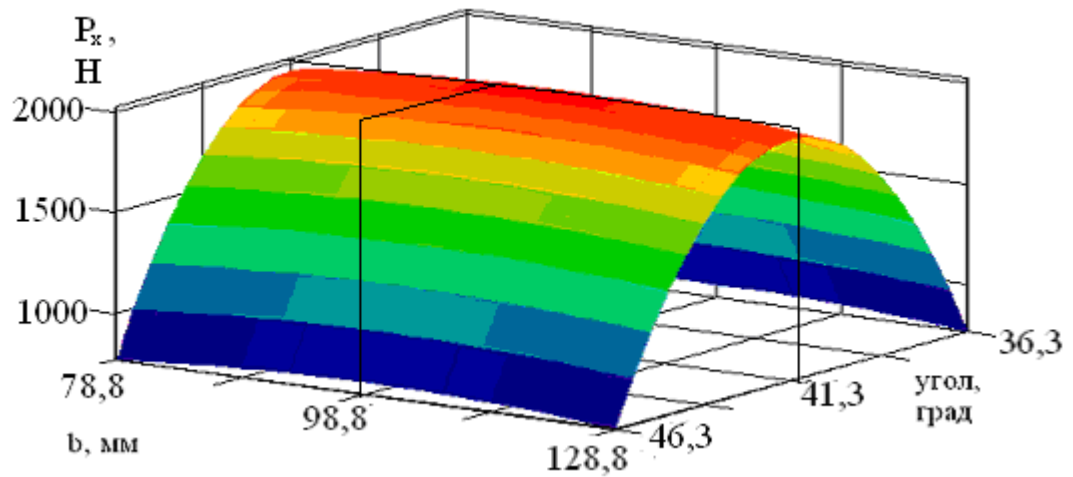


Рисунок 9.17 – Поверхность отклика, силы сопротивления рабочего органа от угла крошения и ширины долота

Уравнение регрессии в канонической форме имеет вид

$$Y_{12} - 2085 = -2,408 \cdot X_1^2 - 0,122 \cdot X_3^2, \quad (9.42)$$

Поверхность отклика – эллипсоид (рисунок 4.14), а ее центр – экстремум. Так как канонические коэффициенты  $B_{11} = -2,408$ ,  $B_{22} = -0,122$  имеют отрицательные знаки в уравнении, то центр поверхности отклика является максимумом. Эллипсоид вытянут по той оси, которой соответствует меньшее значение по абсолютной величине коэффициента канонического уравнении (9.42). В нашем случае по оси  $X_2$ , т. к.  $|B_{22}| < |B_{11}|$ . Следовательно, в данной паре взаимодействия факторов более существенное влияние на отклик оказывает ширина долота.

Аналогично получены, рассмотрены и проанализированы двумерные сечения  $X_1SX_3$  (рисунок 9.17);  $X_2SX_3$  (рисунок 9.18);  $X_2SX_4$  (рисунок 9.19);  $X_3SX_4$  (рисунок 9.20).

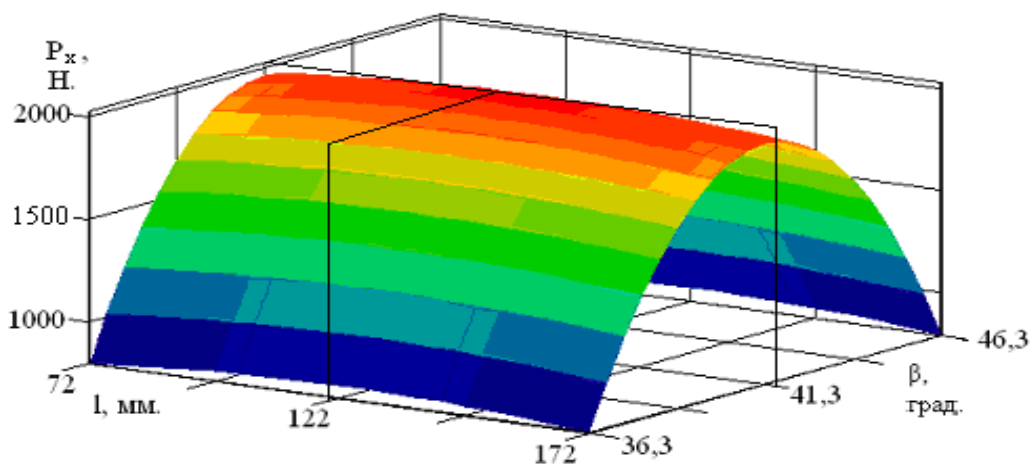


Рисунок 9.17 – Поверхности отклика в зависимости от угла крошения и длины долота

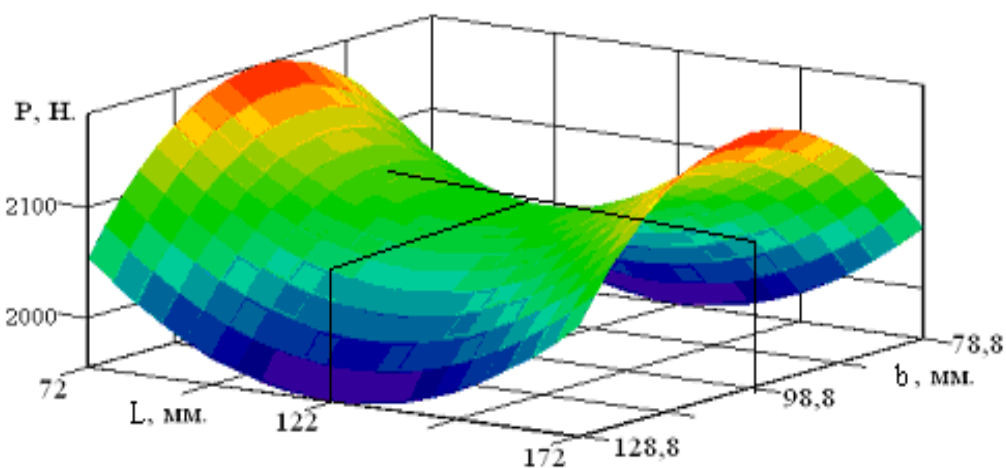


Рисунок 9.18 – Поверхность зависимости тягового сопротивления от длины рабочей поверхности и ширины долота рабочего органа.

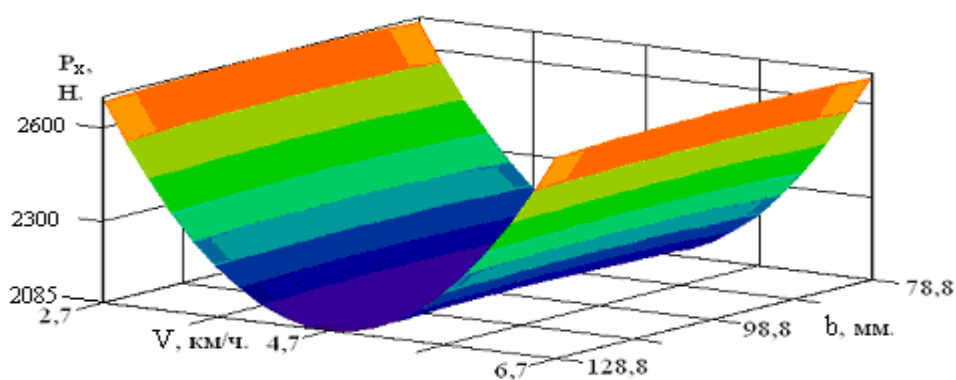


Рисунок 9.19 – Поверхность отклика  $S_2 \times S_4$

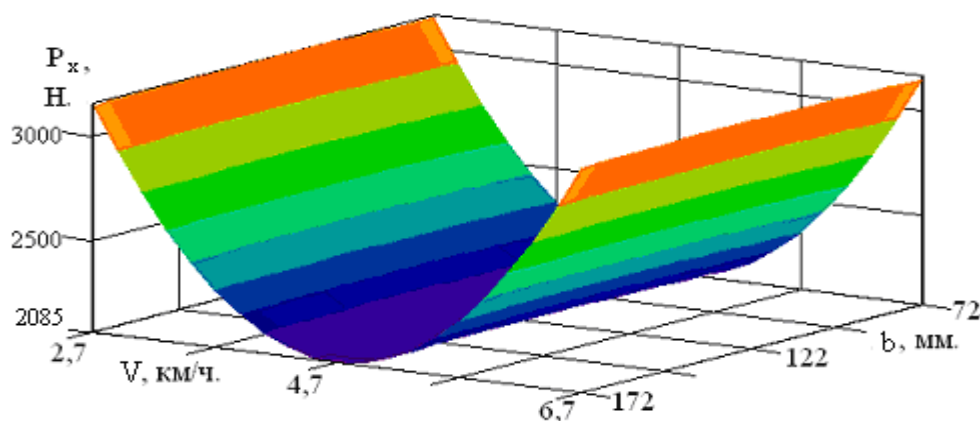


Рисунок 9.20 – Поверхность отклика  $X_3 S X_4$

Каноническое преобразование экспериментальной модели полученной применением симметричного композиционного плана типа  $V_k$  [14, 15, 41] показало, что середины интервалов варьирования исследуемых факторов имеют новые значения в кодированном виде  $x_1 = 0,29$ ,  $x_2 = 0,443$ ,  $x_3 = -0,152$ ,  $x_4 = -0,655$  и переведенные в натуральный вид:

- оптимальная ширина составила  $b = 98,8$  мм;
- оптимальная длина рабочей части долота  $\ell = 122$  мм;
- оптимальный угол крашения долота  $\beta = 41,3^\circ$ ;
- скорость перемещения орудия с наименьшими показателями энергоемкости процесса  $v = 4 \dots 5$  км/ч.

#### 9.7.5 Проверка на адекватность теоретической зависимости

Проверку на адекватность теоретической зависимости проводили методом наложения ее на экспериментальную модель.

Для этого в теоретическую функцию, подставили определенные оптимальные значения параметров трёх факторов  $\beta = 41,3^\circ$ ,  $b = 98,8$  мм,  $\ell = 122$  мм, а четвертый скорость перемещения, изменяем в пределах интервала варьирования. Провели расчеты и построили параметрическую кривую теоретической зависимости  $P_m(v)$  в декартовой системе координат, где по оси ( $y$ ) – расположен отклик  $P_x$ , а по ( $x$ ) – интервал варьирования скорости перемещения рабочего органа.

Аналогично определили параметрическую кривую экспериментальной модели  $P_3(v)$ , и построили ее в той же декартовой системе координат (рисунок 9.21).

Определили коэффициент сходимости аналитической зависимости и экспериментальной модели по разработанной программе для ЭВМ, получили  $\tau = 0,732$ . Проверили выполнение необходимого условия для подбора коэффициента совмещения функций,  $(\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2 - \min)$ , а разность отклонений определили по выражению,

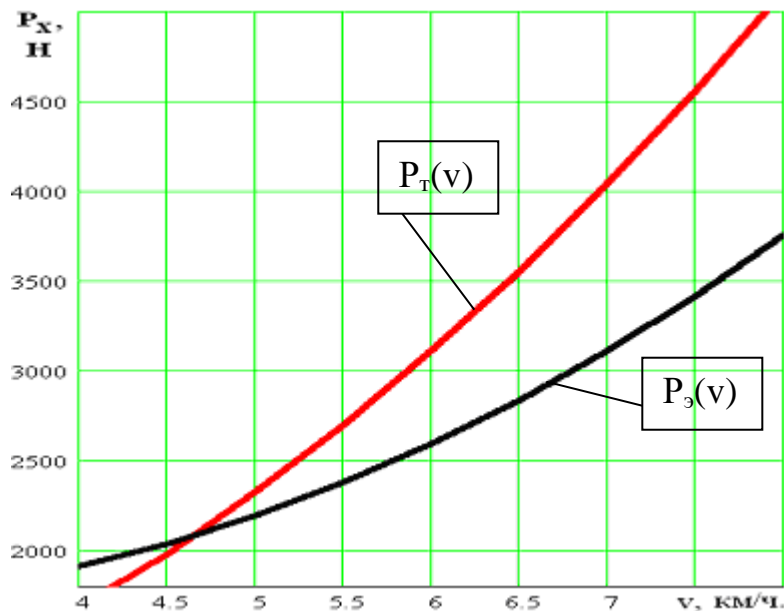


Рисунок 9.21 – Метод наложения аналитической зависимости на экспериментальную модель  $P_3(v)$  и  $P_T(v)$  – соответственно экспериментальная функция и аналитическая зависимость от скорости перемещения.

$$S_y = F_T(v) - F_3(v), \quad (9.43)$$

где  $F_T(v) - F_3(v)$  – соответственно аналитическая зависимость и экспериментальная функция от скорости перемещения.

Проверили на адекватность аналитическую зависимость по критерию Кохрена [8,14, 41] по условию,

$$G_{\text{расч}} \leq G_{\text{таб}}, \quad (9.44)$$

Определили величину  $G_{\text{расч}}$ . – критерия по выражению,

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{y_u \text{ max}}^2}{\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2}, \quad (9.45)$$

где  $S_{y_u \text{ max}}^2$  – квадрат разности максимального отклонения,

$\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2$  – сумма, квадрата разности отклонений.

Определили величину степени свободы по выражению,

$$f = N - 1, \quad (9.46)$$

$$\text{где } N = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\Delta} + 1,$$

где  $x_{\max}$  – максимальное значение абсциссы;

$x_{\min}$  – минимальное значение абсциссы;

$\Delta$  – величина шага изменения абсциссы;

$f$  – степень свободы.

Получили величину степени свободы  $f = 13$  и расчетного критерия  $G_{расч} = 0,012$ . Выбрали по таблице приложения VI [4] при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и степени свободы  $f = 13$ , получили  $G^m = 0,766$ .

Функция адекватна, т.к. выполняется условие (9.42), при этом коэффициент совмещения равен  $\tau = 0,732$ .

Аналогично проведена проверка адекватности аналитической зависимости по остальным факторам. Следовательно, данную аналитическую зависимость можно применять для расчета конструктивных параметров типовых орудий.

#### 9.7.6 Производственные испытания универсального рабочего органа

Испытания проводили в ОАО КСП «Светлогорское» Абинского района Краснодарского края.

Сравнивали энергетические показатели применяемого в хозяйстве рабочего органа плуга чизельного ПЧН-2,5 и универсального орудия.

Для этого изготовили долото с конструктивными оптимальными параметрами  $\beta = 41,3^\circ$ ;  $b = 98,8$  мм;  $l = 122$  мм. Разбили делянки по междурядью сада длиной 100м, отметили колышками. Поочередно устанавливали на динамометрическую установку рабочие органы ПЧН-2,5 и универсального орудия.

Для получения точных показаний определяли объем выборки так, что бы выборочная средняя характеризовала объем дизельного топлива и действующей силы сопротивления почвы на рабочие органы.

Для больших совокупностей объем выборки вычисляли по формуле [14, 15].

$$n = \left( \frac{t \cdot v}{S_{\bar{x}}} \right)^2, \quad (9.47)$$

где  $n$  – объем выборки;

$t$  – критерий Стьюдента;

$v$  – коэффициент вариации;  
 $S_{\bar{x}}$  – планируемая ошибка выборочной средней.

При 95 % уровне вероятности и степеней свободы бесконечное множество, выбрали  $t = 1,96$ , вариация признака  $v$  в большинстве случаев составляет 10...20 %.

Принимая достаточную точность данных опытов, и взяв промежуточные значения двух последних параметров, получили:

$$n = \left( \frac{1,96 \cdot 15}{3} \right)^2 = 96,04$$

Число повторностей приняли не менее 100.

После проведения замеров, полученные данные обработали по разработанной программе, определили: среднее значение, стандартное отклонение, ошибку выборочной средней, коэффициент вариации, относительную ошибку. Провели однофакторный эксперимент при варьировании скорости на двух уровнях, при этом фиксировали показания: терминал-регистратора СКРТ Лайт – 31 GPS Технотон – расход дизельного топлива, (л) и скорость прохода опытной делянки, (км/ч). Динамометром ТД – 8 – силу сопротивления почвы, Н, действующую на рабочий орган.

Показания динамометра фиксировали фотокамерой DMC-LS70 в режиме кинокамеры со скоростью 30 кадров в секунду. Полученные результаты съемки обработали при помощи программы Quik Time Player на персональном компьютере с ПО Windows XP, затем составили вариационный ряд и обработали методом математической статистики по разработанной программе.

Полученные результаты обрабатывали по разработанным программам, получили:

Для универсального рабочего органа:

– сила сопротивления почвы при оптимальной скорости перемещения [48] составила 2085Н с ошибкой выборочной средней 7,03%, относительной ошибкой выборочной средней 3,48 %, коэффициентом вариации  $V = 1,55\%$  и среднеквадратичным отклонением  $\sigma = 3,14$ ;

– массовый расход топлива за опыт 146см<sup>3</sup> с ошибкой выборочной средней 3,7889%, относительной ошибкой выборочной средней 2,593% коэффициентом вариации  $V = 11,598\%$  среднеквадратичным отклонением  $\sigma = 1,69$ .

Для рабочего органа ПЧН-2,5:

– сила сопротивления почвы 2413Н, при этом ошибка выборочной средней 1,54%, ошибка выборочной средней 0,64%, относительной ошибкой выборочной средней 2,593% коэффициентом вариации  $V = 2,86\%$  среднеквадратичным отклонением  $\sigma = 1,545$ ;

– массовый расход топлива за опыт 168см<sup>3</sup>, с относительной ошибкой выборочной средней 2,84%, ошибкой выборочной средней 2,593%,

коэффициентом вариации  $V = 12,7\%$  и среднеквадратичным отклонением  $\sigma = 4,77$ .

Глубину обработки (установили 20см) – измеряли линейкой (рисунок 4.20 и 4.21) относительно координатной рейки, а время прохода опытной деланки – секундомером.

В ходе эксперимента отмечен устойчивый ход по глубине обработки универсального рабочего органа. Обработав данные методом математической статистики, получили среднее значение глубины обработки почвы  $20 \pm 1$  см коэффициент вариации  $V = 3,154\%$ , относительная ошибка выборочной средней составила  $0,089\%$ , среднеквадратичное отклонение  $\sigma = 0,631$ . Неустойчивый ход ПЧН-2,5 – 12...14см (рисунок 9.22), при этом физические свойства почвы следующие: плотность  $1,58 \text{ г/м}^3$ , относительная влажность (весовая)  $5,8\%$  и твердость 17 кПа.



Рисунок 9.22 – Измерение глубины обработки после прохода рабочих органов

1 – универсального; 2 – ПЧН-2,5

Таблица 9.5 – Результаты сравнительных испытаний

Наименование параметра	Универсальный рабочий орган	Рабочий орган ПЧН-2,5	Разница в, %.
Скорость перемещения, км/ч.	4...5	4...5	0
Часовой расход топлива, см <sup>3</sup> .	146	168	-12,9
Сила сопротивления, Н.	2017	2413	-16,4

Полученные результаты расхода топлива  $V_m$  кубические машина тракторного агрегата за время  $t$  сек, перевели в массовый часовой расход.



### 9.7.8 Краткие выводы:

1. По конструктивным особенностям и предварительным однофакторным экспериментам установили интервалы варьирования

- ширина долота, 70...120 мм;
- длина рабочей части долота, 80...180 мм;
- угол крошения долота, 35...45°;
- скорость перемещения рабочего органа 4...8 км/ч, согласно исходным требованиям на базовые технологии.

2. Составлена матрица планирования симметричного композиционного плана по типу  $V_k$ .

3. В результате эксперимента получена математическая модель процесса обработки почвы по контуру залегания корневой системы в междурядьях сада, позволяющая определять конструктивные параметры рабочих органов разрабатываемых и модернизируемых почвообрабатывающих машин.

3. Каноническое преобразование математической модели и анализ параметрических гиперповерхностей позволил определить оптимальные, конструктивные параметры долота универсального рабочего органа:

- ширина долота,  $b = 98,8$  мм;
- длина рабочей части долота  $\ell = 122$  мм;
- угол крошения долота  $\beta = 41,3^\circ$ ;
- интервал оптимальной скорости перемещения рабочего органа 4...5 км/ч;
- величина горизонтальной составляющей силы сопротивления почвы составила 2085 Н.

4. Определена аналитическая зависимость энергоемкости процесса обработки почвы по контуру залегания корневой системы плодовых деревьев от рабочей скорости (4.8), позволяющей определить ее оптимальное значение.

5. Экспериментально получен коэффициент  $\tau = 0,732$ , позволяющий применять полученную аналитическую зависимость (2.48) для расчета конструктивных параметров аналогичных рабочих органов.

6. Производственными испытаниями универсального рабочего органа установили:

- сила сопротивления почвы, действующая на универсальный рабочий орган меньше на 16,4%, чем на рабочий орган ПЧН-2,5;
- часовой расход топлива предлагаемого машинотракторного агрегата меньше на 12,9%, чем базовый вариант;
- универсальный рабочий орган имеет устойчивый ход по глубине обработки почвы  $20 \pm 1$  см, коэффициент вариации  $V = 3,154\%$ , относительная ошибка выборочной средней составила 0,089%, среднеквадратичное отклонение  $\sigma = 0,631$ ;
- энергоемкость процесса обработки почвы универсальным рабочим органом меньше на 50,1%.

## 10 Оптимизация параметров и режимов работы ультробъемного садового опрыскивателя

### 10.1 Программа экспериментальных исследований

Цель экспериментальных исследований – проверить достоверность наших теоретических разработок. Это касается процесса распределения жидкости и нанесения ее на объект обработки, плотности покрытия и равномерности ее распределения.

Программой экспериментальных исследований предусматривалось выполнение следующего объема работ.

1. Экспериментальное определение оптимального значения конструктивного параметра диаметра питательной трубки эжекционно-щелевого распылителя.

2. Определение оптимального значения угла наклона питательной трубки относительно щелевого сопла струйного элемента.

3. Определение оптимального положения уравнивательной емкости относительно эжекционно-щелевого распылителя.

4. Определение производительности распылителя и таких качественных показателей, как плотность покрытия обрабатываемого объекта каплями, их медианно массовый диаметр (ММД), равномерность распределения воздушно-капельной смеси.

5. Определение скорости воздушно-капельной смеси, транспортируемой вентилятором на объект обработки.

### 10.2 Экспериментальная установка, приборы и аппаратура, применяемые в исследованиях

Лабораторно-полевая установка вентиляторного эжекционно-щелевого УМО

Для проведения лабораторных и лабораторно-полевых исследований нами была изготовлена специальная установка, с помощью которой можно было работать на стационаре в лаборатории (рисунок 3.1) и производить лабораторно-полевые испытания. Установка была изготовлена на базе серийного опрыскивателя ОШУ-50А, агрегатируемого с тракторами класса тяги 1,4.

Технологическая схема опрыскивателя (рисунок 10.2) включает источник сжатого воздуха, раму (не показаны), на которой смонтирован резервуар 1 с рабочей жидкостью, кран 2, уравнивательную емкость 3 с питательными трубопроводами 4, вентилятор 5 с приводом от вала отбора мощности трактора (ВОМ) через редуктор (не показан), распыливающее устройство 6, воздушную магистраль 7, сообщенную с регулятором давления воздуха 8 через ресивер, воздухопровод 9 и распылители 10, расположенные ярусами на распыливающем устройстве 6.

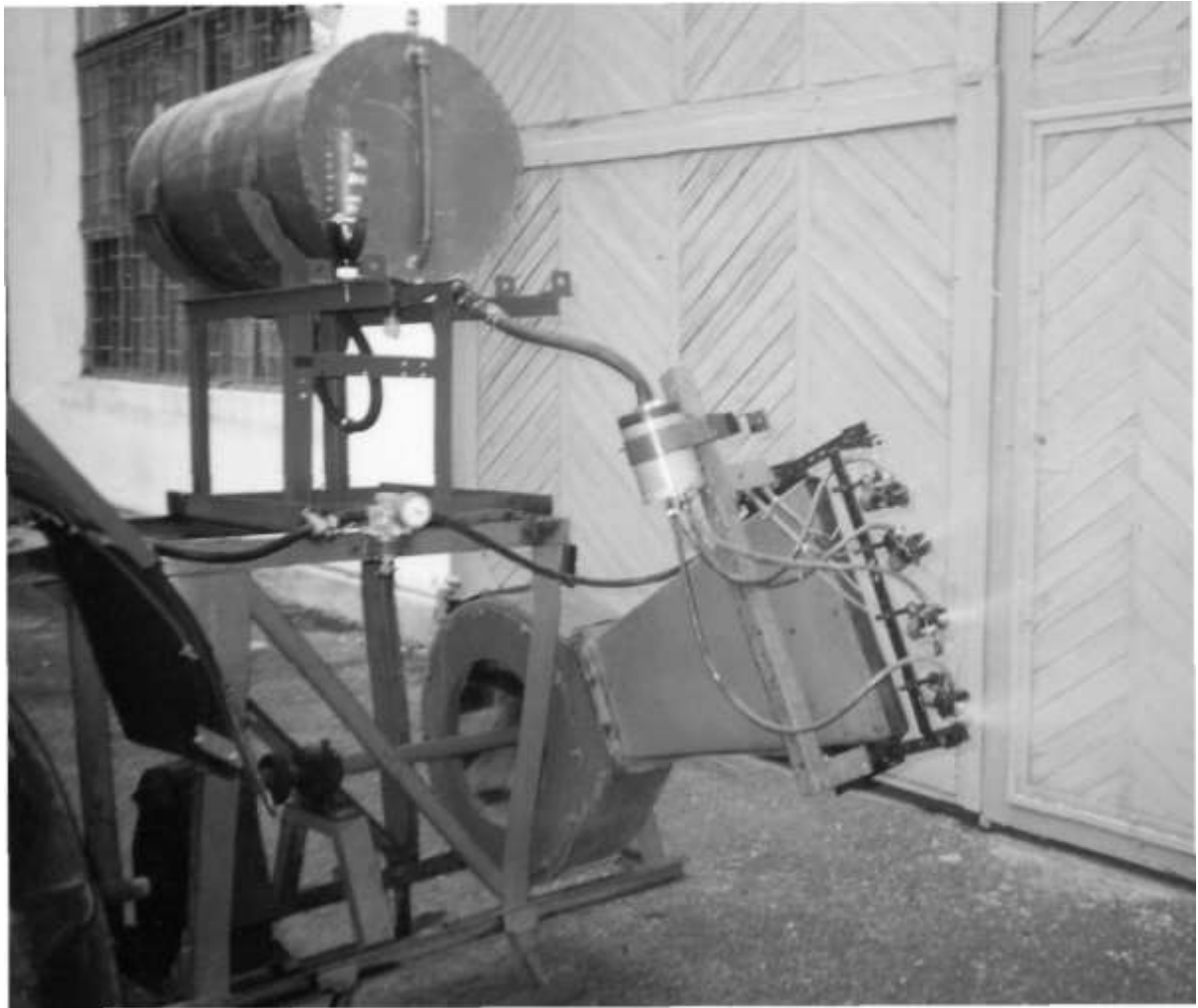


Рисунок 10.1 Лабораторно-полевая установка вентиляторного эжекционно-щелевого УМО

Работает опрыскиватель следующим образом. Воздух от источника сжатого воздуха через ресивер и регулятор давления подводится по воздушной магистрали 7 через регулятор 8 и воздухопроводы 9 к эжекционным распылителям 10. Рабочая жидкость из резервуара 1 поступает к эжекционным распылителям 10 через кран 2 и уравнительную емкость 3 по питательным трубопроводам 4 самотеком в полости распылителей 10. создаваемого смешанной струей воздуха, истекаемого из воздушно-щелевого сопла распылителя и подаваемого вентилятором 5 в корпус распылителя, где диспергируется, смешивается с воздухом и подается на объект обработки.

10.3 Лабораторная установка для определения качественных показателей распыла жидкости.

Она состояла (рисунок 10.2) из рамы с установленным на ней ленточным транспортером 1, приводимым в действие закрепленной на раме ременной 2 от электродвигателя 3, посредством пульта управления 4. Над транспортером

на кронштейне 5 фиксировался распылитель 6, к которому от компрессорной установки 7 подводился воздух через регулятор давления 8 и поступала вода из мерного стакана 9, через уравнительную емкость 10 устанавливалась на площадке 11 штатива 12, положение которой менялось и фиксировалось по

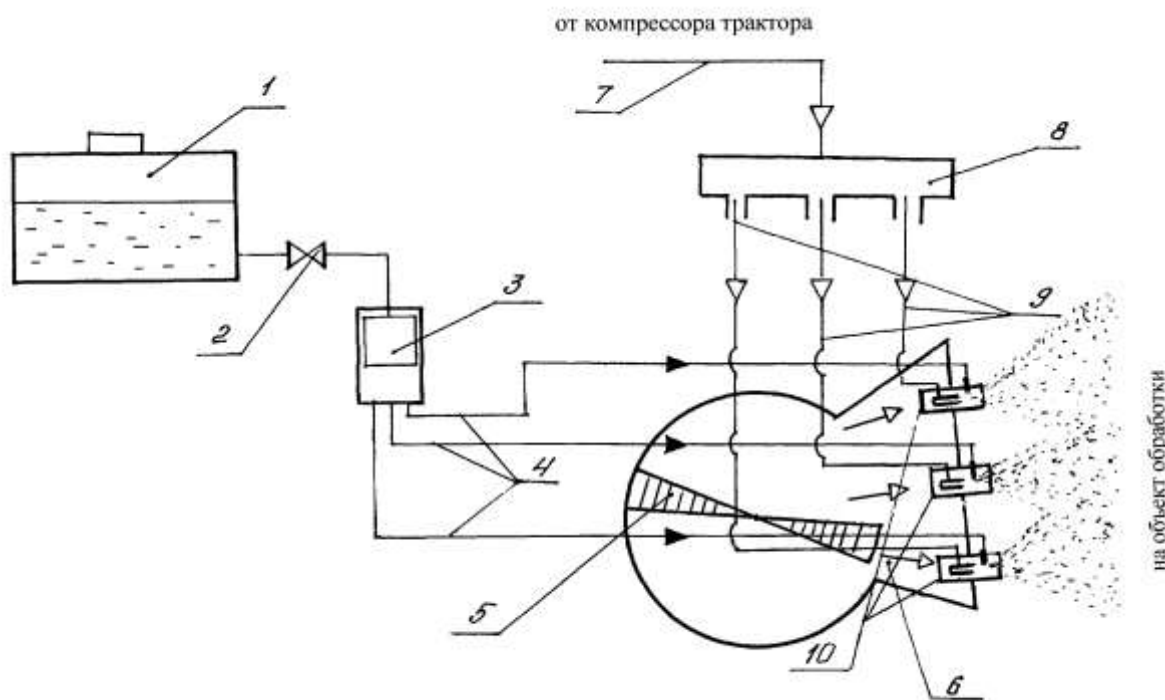


Рисунок 10.2 Схема технологического процесса работы экспериментального вентиляторного эжекционно-щелевого УМО

#### Техническая характеристика

Емкость бака	л	50
Ширина захвата	м	10
Количество распылителей	шт.	4,0
Объем уравнительной емкости	л	1,0
Рабочая скорость	км/ч	7,2
Рабочее давление воздуха	МПа	0,15
Габаритные размеры:		
длина	м	1,4
ширина	м	1,4
высота	м	2,0
Масса	кг	180

шкале на линейке штатива 12. Компрессорная установка 17 состояла из станины с электродвигателем и компрессором, связанных ременной передачей и пульта управления 13. Натяжение ленточного транспортера 1 обеспечивалось двумя натяжными роликами 14.

#### Техническая характеристика

Мощность электродвигателя, кВт	
компрессора	1,2
транспортера ленточного	1,5
Длина транспортера, м	6,0
Ширина транспортера, м	0,4
Скорость движения транспортера, м/с	7,0
Цена деления регулятора давления, МПа	0,005
Цена деления шкалы кронштейна с уравнительной емкостью, м	0,01
Пределы регулировки давления, МПа	0,1...0,3
Пределы регулировки положения уравнительной емкости, м	-0,10+0,10
Объем мерного стакана, л	1,0

На транспортер ленточный раскладывали коллекторы для измерения медианно-массового диаметра и плотности покрытия. Приводили в действие через пульт управления компрессорную установку, предварительно установив давление в пневмомагистрали регулятором давления, установили распылитель с заданным диаметром питательной трубки и углом ее наклона, в положение над транспортером и положение мерного стакана относительно щелевого сопла распылителя, и включали ленточный транспортер. После вывода коллекторов за пределы воздушно-капельной струи от распылителя, транспортер и компрессор выключали. Проводили анализ качественных показателей и производительности распылителя по соответствующим методикам.

Так же нами были проведены экспериментальные исследования качественных показателей воздушно-капельной смеси в дополнительном воздушном потоке.

Для этого в закрытом помещении мы подготовили площадку с размещенными на ней коллекторами, каждый из которых находился на расстоянии 0,5 м друг от друга на протяженности 10 м. Эти коллекторы были закреплены на поверхности площадки и пронумерованы.

Затем заправили бак лабораторно-полевой установки вентиляторного эжекционно-щелевого УМО КГАУ (рисунок 10.1) красителем. После чего, включив установку, двигались со скоростью 7,2 км/ч нанося на поверхность коллекторов окрашенную жидкость. Проводили анализ качественных показателей по соответствующим методикам.

Для определения скорости воздушного потока из щелевого сопла и сопла вентилятора использовали анемометр АРИ-45.

## 10.4 Общая методика экспериментальных исследований

При исследовании полидисперсной системы капель, образованных в результате дробления жидкости, наиболее точные результаты дает вероятностно-статический метод анализа.

Примеры статической обработки результатов наблюдений или исследований широко применяются в технике при изучении массовых явлений, при проведении полевых опытов в сельском хозяйстве.

В большинстве случаев изучаемый вариационный ряд состоит из наблюдаемых величин или признаков, распределенных по классам, где в качестве средней используется среднеарифметическое значение величины

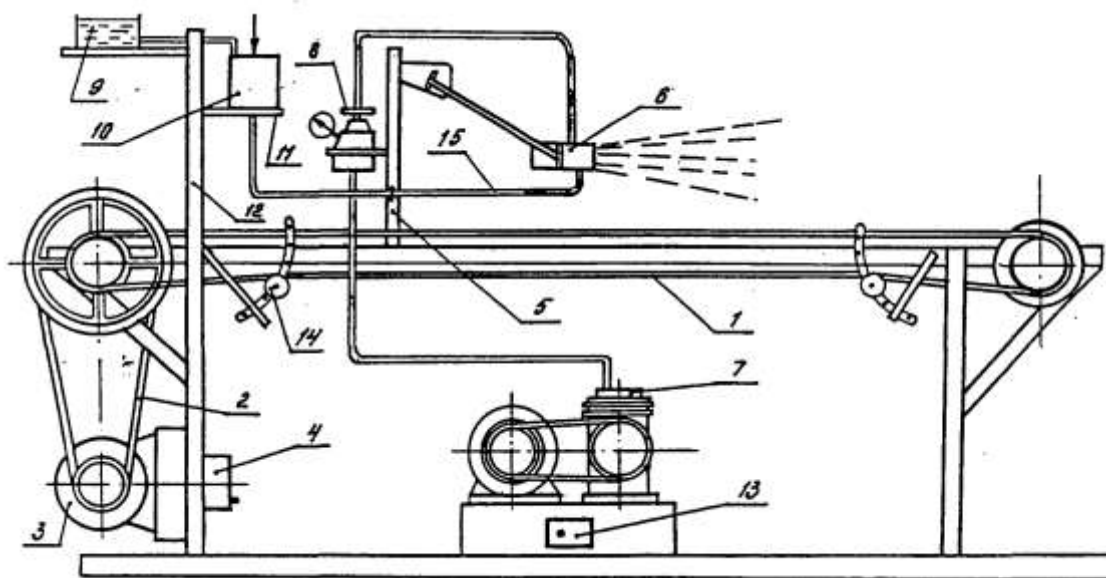


Рисунок 10.3 Лабораторная установка для определения качественных показателей распыла жидкости

или признака. Это характерно для капельного спектра струйных распылителей, которые характеризуются среднеарифметическим диаметром капель и распределением их по линейным размерам.

Достаточно полную характеристику струи дает распределение весов или объемов жидкости, заключенных в каплях каждого класса размеров, а в качестве средних принимается медианно-массовый диаметр  $d_m$ , медленно численный диаметр  $d'_m$  и средне-объемный диаметр  $d_v$ .

## 10.5 Частные методики экспериментальных исследований

### 10.5.1 Исследования расхода рабочей жидкости распылителя.

Исследования проводили в зависимости от следующих факторов:

- диаметр питательной трубки;
- угол наклона питательной трубки;

- статистическое давление рабочей жидкости в питательной трубке, Н.

Для исследования расхода рабочей жидкости использовали лабораторную установку (рисунок 10.3), состоящую из распылителя, включенного в пневмомагистраль от компрессора и жидкостную магистраль, связанную с питающей емкостью в виде мерного стакана.

Заборный шланг опускали в мерный стакан. Включив компрессор, открывали кран подачи воздуха к струйному элементу распылителя и устанавливали давление, равное 1,2 МПа. Пользуясь секундомером, определяли секундный расход рабочей жидкости  $q$ .

Положение питательной емкости регулировали по высоте для изменения статистического давления рабочей жидкости путем изменения положения площадки для емкости на штативе. Каждый замер при заданных параметрах рабочего органа (распылителя) производили в трехкратной повторности [41].

Конструктивные параметры распылителя:

- диаметр выходного отверстия питательной трубки  $d_{\text{вых}} = 1$  мм; 2 мм; 3 мм; 4 мм; 5 мм;
- угол наклона питательной трубки к направлению воздушного потока щелевого сопла распылителя  $\alpha = 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; 75^\circ; 90^\circ$ ;
- положение уравнительной емкости  $h = +10$  см; +5 см; 0; -5 см; -10 см.

#### 10.5.2 Исследование качества обработки объекта.

Характеристика распределения плотности покрытия определяется по количеству капель и по массе рабочей жидкости. Плотность покрытия поверхности объекта каплями рабочей жидкости является одним из качественных показателей обработки объекта. Под плотностью покрытия понимается количество капель на объекте на площади в  $1 \text{ см}^2$ .

Качество обработки объекта определяли на лабораторной установке (рисунок 10.3), которая представляла собой ленточный транспортер, приводимый в действие электродвигателем через редуктор. Транспортерная лента натянута на двух барабанах, закрепленных на сварной раме. Один барабан является ведущим, а второй натяжным. На раме транспортера с помощью кронштейна с хомутом закреплен распылитель, факел которого мы можем направлять как параллельно оси движения транспортера, так и перпендикулярно. Скорость движения транспортерной ленты  $V = 7$  км/ч.

Обрабатываемую поверхность имитировали коллекторами из глянцевого картона, которые закрепляли на ленте транспортера перпендикулярно факелу распыла распылителя в вертикальной и горизонтальной плоскости. В горизонтальной плоскости при каждом эксперименте находилось три коллектора размером  $100 \times 210$  мм, находившихся на расстоянии 40 см; 60 см; 80 см от выходного отверстия распылителя, а горизонтальный на расстоянии 80 см от распылителя напротив оси факела распыла и его размер составлял  $210 \times 297$  мм.

Эксперимент проводился в 3-х кратной повторности. Коллекторы получали соответствующие номера. Для определения плотности покрытия использовали микроскоп с 20-ти кратным увеличением (рисунок 3.4). Замеренное количество капель заносили в таблицу. При каждом эксперименте капли подсчитывали в 16 местах, выбранных по ширине захвата струи через равные промежутки соответственно в вертикальной плоскости в 10 местах, а горизонтальной 6. На основании данных, внесенных в таблицу, определяли:

- среднюю плотность покрытия;
- коэффициент вариации, то есть равномерность распределения капель.

Степень покрытия  $M$  поверхности коллекторов каплями жидкости определяли по формуле:

$$M = \frac{25 \cdot \pi}{f_0} \sum_1^n d_n^2 \% , \quad (10.1)$$

где  $d_1; d_2 \dots d_n$  - диаметры следов капель, мкм;

$n_1; n_2 \dots n_n$  - количество следов капель;

$f_0$  - площадь полей зрения, мкм<sup>2</sup>.

10.5.3 Распределение капель по размеру так же, как и плотность покрытия объекта, определяет качество обработки.

Для исследования распределения капель была предложена методика распределения спектра капель. На каждом объекте капли измеряли и классифицировали по классам размера.

Каждый класс характеризовали минимальным размером капель в классе -  $r_{i_{\min}}$ , максимальным -  $r_{i_{\max}}$  и средним размером -  $r_i = \frac{r_{i_{\min}} + r_{i_{\max}}}{2}$ , где

$d_r = r_{i_{\min}} - r_{i_{\max}}$ ,  $d_r$  - ширина интервала размеров капель в классе. Если  $d_r$  постоянно по всей выборке, то данные исследования будут более надежными. Ширина интервала была соразмерна со значением наивероятнейшего радиуса  $r_0$  в распределении:  $d_r = (0,2 \div 0,3)r_0$ . Наивероятнейший радиус  $r_0$  соответствовал максимуму кривой распределения по классам размеров капель или медианно-массовому радиусу:  $r_0 = r_m$ . Необходимое число интервалов  $N = 8 \div 16$ .

Толщина распыла характеризовалась средним диаметром капель жидкости, учтенных на поверхности коллекторов. Средний диаметр следа капли вычисляли по формуле:

$$d_{m_c} = \sqrt{\sum_1^n \frac{d^2 n}{n}} . \quad (10.2)$$

На бумажках для установления распыла определяли две самые крупные капли, принадлежащие к общему спектру капель. Эффективный диаметр



капель исчисляли из найденного диаметра капли, определенного с использованием фактора распространения:

$$d_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{0,78(d_{m_{\text{max}}} + 2r)^2}{\pi}}, \quad (10.3)$$

где  $d_{m_{\text{max}}}$  - максимальный диаметр следа капли;

$r$  - зона эффективного действия,  $r = 100...200$  мкм.

Медианно-массовый диаметр:

$$d_m = \frac{d_{\text{эф}}}{2.2}, \quad (10.4)$$

где 2.2 – эмпирический фактор.

Диаметр следа капли

$$D_i = \frac{D_{\text{нач}_i} + D_{\text{кон}_i}}{2} \text{ мк}, \quad (10.5)$$

где  $D_{\text{нач}_i}$  - диаметр следов капель в начале  $i$ -го класса;

$D_{\text{кон}_i}$  - диаметр следов капель в конце  $i$ -го класса.

С учетом коэффициента растекания вычисляли средний диаметр капли

$$d_i = \frac{D_i}{k} \text{ мк}. \quad (10.6)$$

Суммируя все капли в размерных группах  $N = \sum n_i$ , подсчитывали густоту покрытия

$$n_c = \frac{N \cdot 10^8}{f_c} \text{ шт/см}^2, \quad (3.7)$$

где  $f_c$  - вся анализируемая поверхность.

Степень покрытия вычисляли из выражения:

$$M = \frac{f}{f_0} 100\%, \quad (3.8)$$

где  $f = \sum f_i$  - суммарная поверхность всех следов капель,

$f_0$  - площадь полей зрения.

$$f_i = 0.785 D_i^2 \cdot n_i \text{ мк}^2, \quad (3.9)$$

где  $n_i$  - количество капель  $D_i$ .

В каждом классе вычисляли объем капель:

$$v_i = 0.524 d_i^3 n_i \text{ мк}^3. \quad (10.10)$$

Подсчитывали суммарный объем всех капель:

$$v = \sum v_i \text{ мк}^3. \quad (10.11)$$

В таблицу заносили величины удельного содержания  $\Delta n_i$  и удельного объема  $\Delta v_i$  каждого класса.

$$\Delta n_i = \frac{n_i}{N} 100\% \quad \text{и} \quad \Delta v_i = \frac{v_i}{V} 100\%. \quad (10.12)$$

Величины  $\Delta n_i$  и  $\Delta v_i$  использовали при построении графиков – характеристик распыла и при вычислении медианно-массового и медианно-объемного диаметров.

Для построения графика распределения капель по оси абсцисс откладывали средние диаметры капель в классе  $d_i$ , а на оси ординат – удельное содержание  $\Delta n_i$  или объем  $\Delta v_i$  - класса.

Построив дифференциальную кривую, получали график распределения капель по размерам; построив интегральную кривую, определяют медианный диаметр осевших капель.

Счетный (количественный) медианный диаметр определяли по условию, когда одна половина всех капель имеет диаметр больше  $d_m$ , другая меньше  $d_m$ .

Массовый (весовой) медианный диаметр определяли как диаметр капли, делящий весь объем распыленной струи на две равные части, т.е. суммарные объемы капель, размеры которых больше или меньше.

Определяли арифметический диаметр капли, как

$$d_a = \frac{\sum d_i n_i}{N} \text{ мк}, \quad (10.13)$$

среднеповерхностный диаметр капли

$$d_f = \sqrt{\frac{f}{0.785N}} \text{ мк}, \quad (10.14)$$

среднеобъемный диаметр капли

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{v}{0.524N}} \text{ мк}. \quad (10.15)$$

10.5.4 Степень использования весового количества жидкости находили из отношения:

$$L_v = \frac{100Q_0}{Q_0} \%, \quad (10.16)$$

где  $Q_0$  - определяли по формуле:

$$Q_0 = \frac{600q_0}{vB} \text{ л/га}, \quad (10.17)$$

где  $q_0$  - общий расход жидкости, л/мин;

$v$  - скорость движения машины, км/ч;

$B$  - ширина захвата машины, м.

$Q'_0$  - массовое количество рабочей жидкости в кг/га поверхности вычисляли по полученным в опытах данным:

$$Q'_0 = \frac{1}{10^7} \rho n_0 \frac{\pi d_r^3}{4}, \quad (10.18)$$

где  $\rho$  - плотность рабочей жидкости, г/см<sup>3</sup>;

$n_0$  - плотность покрытия обрабатываемой поверхности каплями рабочей жидкости, шт/см<sup>2</sup>;

$d_r$  - средний диаметр капель рабочей жидкости, мк.

10.5.5 Анализ равномерности проводили на основе результатов исследования распределения по медианно-массовому (ММД) и медианно-численному (МЧД) диаметрам при анализе объема рабочей жидкости, покрывающей объект обработки.

Показателем равномерности рабочей жидкости по ширине захвата был принят коэффициент вариации [14].

Коллекторы (карточки из мелованной бумаги) раскладывали на поверхности земли в пяти сечениях с интервалами в 0,3 м при боковом дутье и 0,06 м при прямом. Размер коллекторов 30x40 мм. Коллекторы оценивались визуально с помощью микроскопа МПБ-2. Согласно методике определяли объем рабочей жидкости на данном участке. Полученные данные заносили в протокол, на основании данных определяли отклонение в распределении от среднего значения:

$$\delta_i = \frac{V_i - V_{cp}}{V_{cp}} 100\%, \quad (10.19)$$

где  $V_i$  - объем жидкости на данном участке, мкм<sup>3</sup>;

$V_{cp}$  - средний объем жидкости на ширине захвата распылителя, мкм<sup>3</sup>.

За максимальную ширину захвата  $b$  принимали ширину участка, на котором в крайней зоне будет не менее 10 кап/см<sup>2</sup>. По результатам расчетов строили графики  $\delta_i = f\left(\frac{\Delta V}{V}\right)$  для прямого и бокового дутья.

Для вывода эмпирических формул определяли экспериментально полученную функциональную зависимость.

Основной метод построения эмпирических формул: подбор типа формулы и нахождение коэффициентов к ней. Сравнивая графики типовой формулы, устанавливали их общее соответствие.

После подбора типа эмпирической формулы для определения ее параметров целесообразней использовать способ наименьших квадратов [14, 15].

Проще всего этим способом определить параметры уравнения принятого типа, если исходное уравнение можно привести к линейному виду

$$y = kx + b.$$

Тогда, если  $y$  - опытные сглаженные значения и  $n$  - число измерений, предполагаемых равноточными, то

$$b = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}, \quad (10.20)$$

$$k = \frac{n \sum xy \sum y - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}. \quad (10.21)$$

10.5.6 Результаты полевых и лабораторных экспериментов обрабатывали в соответствии с методами вариационной статистики.

По всем опытам вычислялось среднее значение варьирующих величин – среднее арифметическое  $M$ :

$$M = \frac{\sum x}{n}, \quad (10.22)$$

где  $x$  - численное значение измеримой величины;

$n$  - число измерений.

Одновременно для каждого вариационного ряда определяли среднее квадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \alpha_s^2}{n-1}}, \quad (10.23)$$

где  $\alpha_s$  - отклонение варианта от среднего арифметического.

Чтобы установить степень варьирования измеряемых величин, характеризующую изменчивость свойств изучаемых объектов, вычисляли коэффициент вариации

$$v = \frac{100\sigma}{M} \% . \quad (10.24)$$

Ошибку опыта определяли по формуле:

$$m = \frac{v}{\sqrt{n}} . \quad (10.25)$$

Показатель точности опыта определяли по формуле:

$$p = \frac{100m}{M} \% . \quad (10.26)$$

## 10.6 Методика обработки данных планового эксперимента

В качестве параметров, характеризующих процесс, были выбраны расход рабочей жидкости, плотность распределения и средний ММД капель.

Среднюю измерений эмпирического ряда параметров вычисляем по формуле:

$$n = \frac{\sum n_i x_i}{\sum x_i}, \quad (10.27)$$

где  $n_i$  - порядковый номер замера параметра;

$x_i$  - независимые переменные.

Для отдельной оценки эффектов факторов и их взаимодействия необходимо применять полный факторный эксперимент (ПФЭ) [8, 11, 12, 14, 15, 41], а так как нелинейность модели может быть вызвана не только взаимодействиями между факторами, но и наличием квадратичных членов, то необходимо предусмотреть составление плана 2-го порядка.

Математическая модель второго порядка имеет вид:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i/j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2, \quad (10.28)$$

где  $b_{ij}$  - эффекты взаимодействий;

$b_{ii}$  - эффекты при квадратичных членах;

$b_0, b_i$  - эффекты при линейных членах;

$y$  - расчетное значение критерия оптимизации;

$x_i, x_j$  - независимые переменные (факторы);

$n$  - количество факторов.

При составлении плана 3-го порядка рационально использовать центральный, композиционный ротатабельный униформплан (ЦКРУП). Этот план отличается тем, что его ядром является (ПФЭ) – полный факторный эксперимент при числе факторов меньшем или равным пяти [41].

Под композиционностью понимается последовательная достройка линейных планов до планов второго порядка. Для этого ядро плана достраивали некоторым количеством звездных точек, расположенных от центра эксперимента на расстоянии звездного плеча «а». Кроме того, для оценки кривизны поверхности отклика добавляли еще точку в центре эксперимента, поэтому план является центральным, а все опыты располагались симметрично вокруг центра основного уровня.

А так как информация о поверхности отклика являлась одинаковой для всех направлений в точках, удаленных на одинаковое расстояние от центра эксперимента, то план является ротатабельным.

$$\sum_{u=1}^N x_u^2 = N\lambda^2, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{u=1}^N x_{iu}^2 x_{ju}^2 = 3N\lambda^4, \quad i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j$$

Здесь  $\lambda$  - некоторая константа, определяющая масштаб плана в целом.

От величин константы  $\lambda$  зависит вид информационного профиля, показывающего величину информации в зависимости от удаления по радиусу  $\rho$  в направлении оси какого-либо фактора от центра.  $\lambda$  выбирали так, чтобы информация оставалась постоянной в интервале  $0 \leq \rho \leq 1$ , при этом  $\lambda < 1$ . То есть составлялся униформ-ротатабельный план.

Для формализации задачи исследования и использования разработанных матриц планирования факторы кодировали по выражению [8, 41]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\nu}, \quad (10.29)$$

где  $X_i$  - кодированное значение фактора, верхний уровень обозначался + 1, нижний – 1;

$X_i$  - натуральное значение фактора;

$X_{0i}$  - натуральное значение фактора на нулевом уровне;

$\nu$  - натуральное значение интервала варьирования фактора.

Натуральное значение интервала варьирования

$$\nu = \frac{X'_i - X''_i}{2}, \quad (10.30)$$

где  $X'_i$  - натуральное значение фактора на верхнем уровне;

$X''_i$  - натуральное значение фактора на нижнем уровне.

Регрессионный анализ результатов эксперимента проводили на ЭВМ по программе, которая представлена в приложении. Перед проведением регрессионного анализа проводили проверку однородности дисперсии по критерию Кохнера [8, 14, 41]. Рассчитанные значения критерия Кохнера  $G$  сравнивали с табличными значениями  $G = 0,05$  при 5%-ном уровне значимости и числе степеней свободы  $f_1 = 1$  и  $f_2 = N$  [14, 41]. При этом значении  $N$  берется равным числу опытов в матрице плана.

При однородности дисперсий рассчитывали коэффициенты регрессии математической модели по результатам опытов ЦКРУП, используя уравнения [41].

Для оценки адекватности представления результатов эксперимента математической модели применяли общую методику, сущность которой может быть представлена так.

Остаточная сумма квадратов дисперсий ( $SS_r$ ) при проведении повторяющихся опытов может быть разложена на две суммы – сумму квадратов, определяющую неадекватность результатов эксперимента ( $SS_{lf}$ ), и сумму квадратов, связанную с дисперсией, характеризующей ошибку опытов ( $SS_y$ ), т.е.

$$SS_r = SS_{lf} + SS_y \quad (10.31)$$

Для проверки адекватности вычисляли  $F$  - критерий Фишера:

$$F = \frac{S_{lf}^2}{S_y^2} = \frac{SS_{lf}}{f_{lf}} / \frac{SS_y}{f_y} \text{ и} \quad (10.32)$$

сравнительно с табличным значением. Здесь  $f_{lf}$  и  $f_y$  - соответственно числа степеней свободы, отвечающие сумме  $SS_{lf}$  и  $SS_y$ .

Дисперсия неадекватности

$$S_{lf}^2 = \frac{k \sum_{u=1}^k (\bar{y} - \bar{y})^2}{N - n - 1}, \quad (10.33)$$

где  $\bar{y}_u$  - среднее значение критерия оптимизации в  $i$ -м опыте при  $k$  повторностях;

$n$  - число факторов;  $n = 0, 1, 2, \dots$ ;

$\hat{y}_u$  - значение критерия оптимизации, вычисленное по уравнению регрессии.

Дисперсия, характеризующая ошибку опыта, определялась по формуле:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^w \sum_{i=1}^k (y_{iu} - \hat{y}_u)^2}{N(k-1)}, \quad (10.34)$$

где  $y_{iu}$  - значение критерия оптимизации в параллельных опытах.

После получения адекватной математической модели второго порядка определяли координаты оптимума и изучали свойства поверхности отклика в окрестностях оптимума.

Для анализа и систематизации уравнение второго порядка приводили к типовой канонической форме вида:

$$Y - Y_s = B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + \dots + B_{nn}X_n^2, \quad (10.35)$$

где  $Y$  - значение критерия оптимизации;

$Y_s$  - значение критерия оптимизации в оптимальной точке;

$X_1, X_2, \dots, X_n$  - новые оси координат, повернутые относительно сторон

$$x_1, x_2, \dots, x_n;$$

$B_{11}, B_{22}, \dots, B_{nn}$  - коэффициент регрессии в канонической форме.

При каноническом преобразовании уравнения второго порядка [41] производился перенос начала координат в новую точку  $S$  и поворот старых осей на некоторый угол в факторном пространстве. Для этого про дифференцировали функцию отклика по каждой переменной и, приравняв к нулю частные производные, решали полученную систему уравнений. Решением системы  $n$ -линейных уравнений находили координаты оптимума. В случае двух независимых переменных, придавая различные фиксированные значения  $Y_c$ , получали серию изолиний на плоскости, на основании которых проводился анализ уравнения регрессии.

После канонического преобразования и определения вида поверхности отклика проводили ее анализ с помощью двухмерных сечений.

Для этого в модель подставляли закодированные значения всех факторов кроме двух. В полученном выражении определяли центр поверхности отклика путем взятия частных производных по каждому фактору и приравнивания полученных выражений к нулю [41].

После канонического преобразования проводили графоаналитический анализ полученного выражения. На графике в координатах независимых переменных с натуральным масштабом наносился центр поверхности отклика, и из него проводились координатные оси главных направлений канонического уравнения.

Придавая различные значения критерию оптимизации, строили серию кривых равного выхода (изолиний) в области допустимых значений варьирования независимых переменных. По кривым сечений судили об изменении величины критерия оптимизации в зависимости от натуральных значений рассматриваемых факторов.

Таким образом, выбрали параметры, характеризующие процесс ультрамалообъемного опрыскивания объекта и рассмотрели математические выражения для их вычисления. Рассмотрели методику обработки экспериментальных данных (регрессионного анализа) при использовании матриц ЦКРУП и разработали программу регрессионного анализа для ЭВМ.

## 10.7 Результаты экспериментальных исследований

### 10.7.1 Оптимизация параметров эжекционно-щелевого распылителя

Режимы работы эжекционно-щелевого распылителя, влияющие на качественные показатели, являются количественными факторами, и задача сводится к выбору их оптимальных величин. Для этого использовали ЦКРУП (трех факторный центральный композиционный ротатабельный равномерный план). Изучалось влияние трех факторов и фиксированы их значения на оптимальных уровнях. Факторы, интервалы и уровни варьирования представлены в таблице 9.1. В отличие от известных исследований к.т.н. Борисовой С.М. в нашей конструкции питательная трубка распылителя расположена сверху его корпуса.

Таблица 10.1 - Факторы, интервалы и уровни варьирования

Факторы	Кодированное обозначение	Интервал варьирования	Уровни факторов				
			-1,682	-1	0	+1	+1,682
Диаметр питательной трубки ( $d$ ), мм	$x_1$	1	1,3	2	3	4	4,7
Угол наклона питательной трубки ( $\alpha$ ), град	$x_2$	15	35	45	60	75	85
Положение уравнивающей емкости ( $h$ ), мм	$x_3$	5	-84	-50	0	+50	+84

Кроме того, в наших исследованиях давление воздуха и его расход приняты постоянными с учетом применяемого компрессора трактора МТЗ-80 (двигатель Д-240).

Как было установлено ранее, на качество опрыскивания влияет количество подаваемой рабочей жидкости (минутный расход  $q$ ), медианно-



массовый диаметр капель (ММД) и плотность покрытия каплями обрабатываемой поверхности или количество капель на  $1 \text{ см}^2$ .

Уровни факторов выбирали таким образом, чтобы оптимальные их значения, рассчитанные теоретически или учитывающие существующие ограничения, попадали в центр интервала варьирования.

Максимальным значением для первого фактора  $x_1$  являлся диаметр питательной трубки распылителя равный  $d_{\max}$  5 мм и снижался до  $d_{\min} = 1$  мм, что соответствовало интервалу варьирования. Существующие опрыскиватели имели значительно меньший диаметр выходных отверстий, что приводило к частому их забиванию и скорому износу.

Работа с питательными трубками, диаметр которых более 5 мм, не позволяет получать необходимое качество обработки объекта из-за крупных капель, выходящих за рамки агротребований.

Для второго фактора  $x_2$  значения угла наклона питательной трубки ( $\alpha$ ) принимались из соображений работоспособности, где звездным точкам соответствовали положения  $30^\circ$  и  $90^\circ$ , а положения, соответствующие интервалу варьирования, определялись по соответствующим зависимостям.

Максимальным и минимальным значением для третьего фактора  $x_3$  было принято положение емкости, соответствующее 84...-84 мм. Нулевая точка для этого фактора соответствовала положению уравнивающей емкости, когда уровень рабочей жидкости в ней совпадал с выходным отверстием питающей трубки. Это не позволяло жидкости истекать из емкости при отключении подачи воздуха.

Другие конструктивные параметры нашего распылителя использовать в качестве управляемых факторов мы считаем нецелесообразно, так как они не являются определяющими для качественной работы распылителя.

Что касается режимов работы, то они ограничены скоростью движения агрегата при опрыскивании - рабочей передачей трактора в диапазоне допустимой агротребованиями и рабочим давлением воздуха для эжектирования и распыления жидкости. Последнее принято с учетом производительности источника энергии (компрессора трактора).

Значения первого фактора устанавливали измерением штангенциркулем, второй фактор фиксировался установкой питательной трубки в соответствующих отверстиях в корпусе распылителя, третий фактор устанавливали измерением по вертикали линейкой

На основании этих рассуждений были выбраны интервалы варьирования и уровни факторов, значения которых занесены в таблицу 9.1.. Опыты проводили согласно описанной выше методике. Порядок проведения опытов выполнялся согласно таблице случайных чисел. Средние величины параметров оптимизации представлены в таблице 9.1. Результаты экспериментальных исследований по определению основных качественных показателей и оптимизации параметров эжекционно-щелевого распылителя обработали по известным методикам.

10.7.1.1 Анализ производительности эжекционно-щелевого распылителя с верхним расположением питательной трубки

После математической обработки экспериментальных данных получили следующие уравнения регрессии для производительности распылителя:

$$Y_1 = 1,306 + 0,12x_1 + 0,077x_2 + 0,424x_3 - 0,089x_2x_3 - 0,177x_1^2 - 0,157x_2^2 + 0,082x_3^2, \quad (10.1)$$

где  $Y_1$  - производительность распылителя, л/мин.

Продифференцировав уравнение по каждой из переменных и приравняв производные нулю, получили систему линейных уравнений:

$$\frac{dy_1}{dx_1} = 0,12 + 2(-0,177)x_1 = 0, \quad (10.2)$$

$$\frac{dy_1}{dx_2} = 0,077 + 2(-0,157)x_2 - 0,089x_3 = 0, \quad (10.3)$$

$$\frac{dy_1}{dx_3} = 0,424 - 0,089x_2 + 2(-0,082)x_3 = 0, \quad (10.4)$$

Решая систему линейных уравнений, находим координаты центра поверхности отклика:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0,339 \\ x_2 &= 0,85 \\ x_3 &= -2,127 \end{aligned}$$

После подстановки в исходное уравнение (9.1) значений  $x_1, x_2, x_3$  находили значения параметра оптимизации в центре поверхности отклика.

При этом получили  $Y_s = 0,908$  л/мин.

Где  $Y_s$ - значение отклика в новом начале координат (свободный член канонического уравнения).

Определим угол  $\alpha$  поворота осей координат поверхности отклика (старых осей) до совмещения с главными осями фигуры:

$$\sin\alpha = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{b_{23}^2}{(b_{22} - b_{33})} + 1}} \right] = 0,179. \quad (10.5)$$

То есть  $\alpha = 10,26^\circ$ .

Тогда коэффициенты к канонической форме:

$$B_1 = b_{11} = -0,177. \quad (10.6)$$

$$B_2 = b_{22}(\cos(\alpha))^2 + b_{33}(\sin(\alpha))^2 + b_{23} \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) = -0,165. \quad (497)$$

$$B_3 = b_{22}(\sin(\alpha))^2 + b_{33}(\cos(\alpha))^2 - b_{23} \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) = 0,09, \quad (10.8)$$

$$J_1 = b_{11} + b_{22} + b_{33}. \quad (10.9)$$

$$J_2 = B_1 + B_2 + B_3. \quad (10.10)$$

$$J_1 = -0,252, \quad J_2 = -0,252,$$

$J_1=J_2$ , то есть преобразования верны.

Уравнение регрессии в канонической форме будет иметь вид

$$Y - 0,908 = -0,177X_1^2 - 0,165X_2^2 + 0,09X_3^2. \quad (10.11)$$

$$\frac{(X_1)^2}{\frac{Y - 0,908}{-0,177}} + \frac{(X_2)^2}{\frac{Y - 0,908}{-0,165}} + \frac{(X_3)^2}{\frac{Y - 0,908}{-0,09}} = 1. \quad (10.12)$$

Поверхность отклика представляет гиперболу, а ее центр - минимакс, поскольку коэффициенты имеют разные знаки [8, 41].

Поверхность отклика изучали с помощью двумерных сечений для более детального представления о ней.

Рассмотрим сечение плоскостью  $X_1SX_2$ .

Для этого в исходное уравнение (9.1) подставим  $x_3 = 0$ . Тогда

$$Y_{12} = 1,306 + 0,12x_1 + 0,077x_2 - 0,177x_1^2 - 0,157x_2^2, \quad (10.13)$$

где  $Y_{12}$  - производительность распылителя при взаимодействии 1 и 2 фактора, 3-й фактор в центре плана.

Выполняя каноническое преобразование, получим уравнение

$$\frac{dy_{12}}{dx_1} = 0,12 + 2(-0,177)x_1. \quad (10.14)$$

$$\frac{dy_{12}}{dx_2} = 0,077 - 2 \cdot 0,157x_2. \quad (10.15)$$

Решая систему линейных уравнений, находим координаты центра поверхности отклика

$$x_1 = 0,339, \quad x_2 = 0,245.$$

Подставляя найденные значения  $x_1, x_2$  в уравнение (9.13), определяем значение параметра оптимизации в центре поверхности отклика, когда  $x_1 = 0$ .

$$Y_{S_{12}} = 1,335.$$

Угол поворота осей равен нулю градусов, т.е. уравнение (9.13) не имеет парных взаимодействий, а коэффициенты регрессии в канонической форме равны  $B_{11} = -0,177; B_{22} = -0,157$ .

Инварианты  $J_1 = -0,334; J_2 = -0,334$ ;

Уравнение регрессии в канонической форме

$$Y_{12} - 1,335 = 0,177X_1^2 - 0,157X_2^2. \quad (10.16)$$

или

$$\frac{X_1^2}{\frac{Y_{12} - 1,335}{-0,177}} + \frac{X_2^2}{\frac{Y_{12} - 1,335}{-0,157}} = 1. \quad (10.17)$$

Поверхность отклика представляет собой эллипсоид (рисунок 9.1), а ее центр - экстремум, причем максимум, так как канонические коэффициенты отрицательны.

Далее рассмотрим сечение поверхности отклика  $X_1SX_3$ . Для этого в исходное уравнение (9.1) поставим  $x_2 = 0$ . Уравнение принимает вид

$$Y_{13} = 1,306 + 0,12x_1 + 0,424x_3 - 0,177x_1^2 - 0,082x_3^2. \quad (10.18)$$

Выполнив канонические преобразования, получим:

$$\frac{dy_{13}}{dx_1} = 0,12 + 2(-0,177)x_1, \quad (10.19)$$

$$\frac{dy_{13}}{dx_1} = 0,12 + 2(-0,177)x_1, \quad (10.19)$$

$$\frac{dy_{13}}{dx_3} = 0,424 + 2 \cdot 0,082 x_3. \quad (10.20)$$

Решая систему линейных уравнений, находим координаты центра поверхности отклика:

$$x_1 = 0,339, \quad x_3 = -2,592.$$

Подставляя найденное значение  $x_1$  и  $x_3$  в уравнение (9.18), определяем значение параметра оптимизации в центре поверхности отклика, когда  $x_2 = 0$ .

$$Y_{13} = 0,777.$$

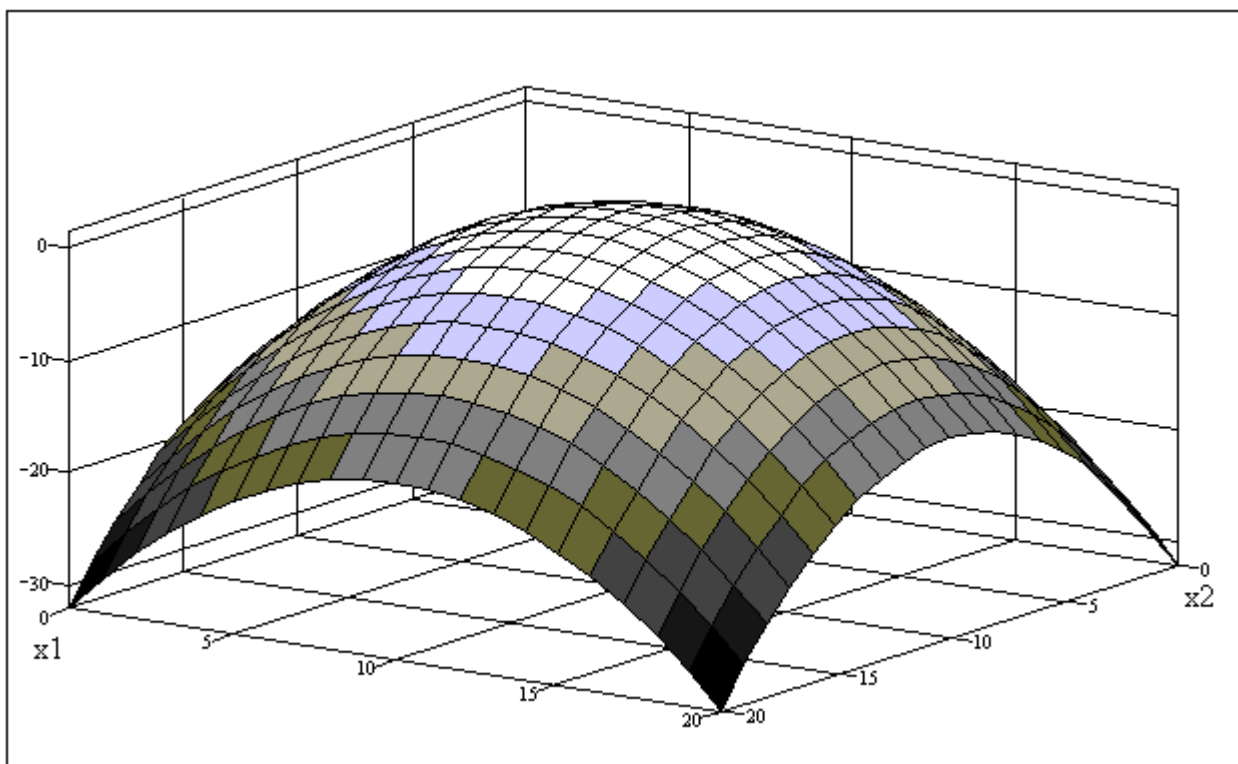


Рисунок 9.1 Поверхность зависимости производительности от диаметра питательной трубки и угла ее наклона

Угол поворота осей равен нулю градусов, так как уравнение (9.18) не имеет парных взаимодействий, а коэффициент регрессии в канонической форме равен:  $B_{11} = -0,177$ ,  $B_{33} = 0,082$ .

Инварианты  $J_1 = -0,095$ ,  $J_3 = -0,09$ .

Уравнение регрессии в канонической форме

$$Y_{13} - 0,777 = -0,177X_1^2 + 0,082X_3^2. \quad (10.21)$$

или

$$\frac{X_1^2}{\frac{Y_{13} - 0,777}{-0,177}} + \frac{X_3^2}{\frac{Y_{13} - 0,777}{0,082}} = 1. \quad (10.22)$$

Поверхность отклика – гиперboloид (рисунок 9.2), а ее центр - минимакс, поскольку коэффициенты имеют разные знаки. Гиперболы вытянуты по той оси, которой соответствует меньшее по абсолютной величине значение коэффициента в каноническом уравнении (9.2).

Рассмотрим сечение поверхности отклика  $X_2SX_3$ . Для этого в исходное уравнение (4.1) подставим  $x_1 = 0$ , тогда уравнение примет вид:

$$Y_{23} = 1,306 + 0,077x_2 + 0,424x_3 - 0,089x_2x_3 - 0,157x_2^2 + 0,82x_3^2. \quad (10.23)$$

Выполнив канонические преобразования, получим уравнение

$$\frac{dy_{23}}{dx_2} = 0,077 - 0,089x_3 + 2(-0,157)x_2, \quad (10.24)$$

$$\frac{dy_{23}}{dx_3} = 0,424 - 0,089x_2 + 2 \cdot 0,082x_3. \quad (10.25)$$

Решая систему линейных уравнений, находим координаты центра поверхности отклика:

$$x_2 = 0,85, \quad x_3 = -2,127.$$

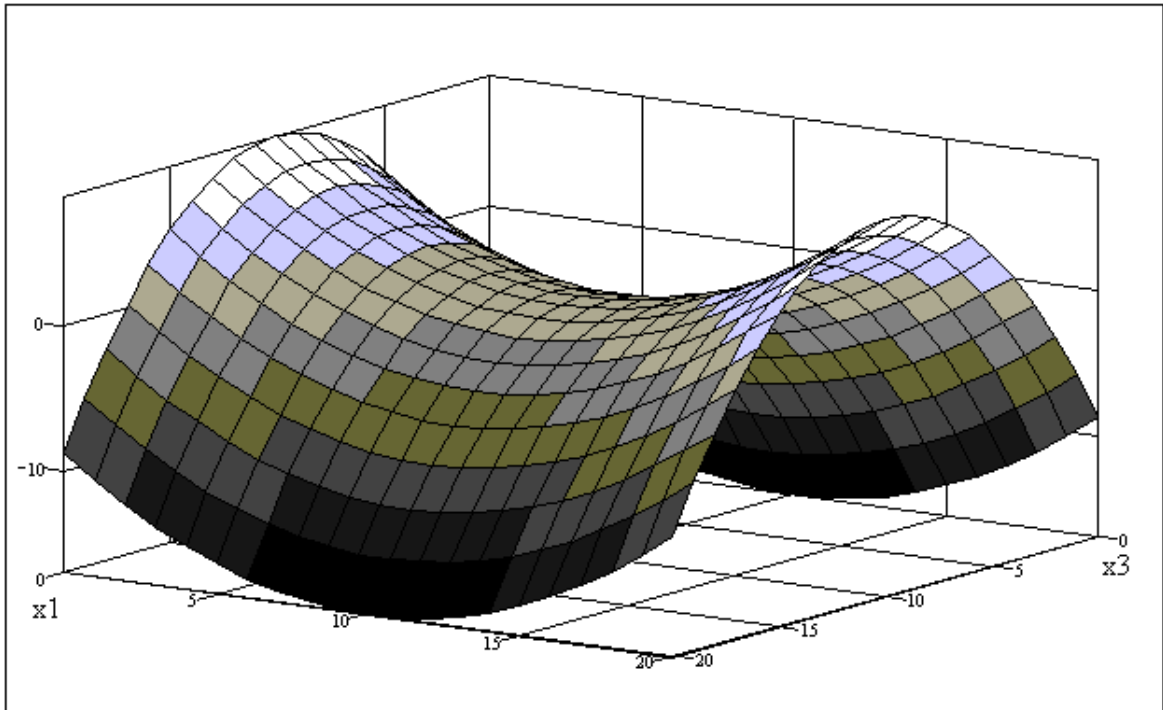


Рисунок 10.2 Поверхность зависимости производительности от диаметра питательной трубки и положения уравнительной емкости

Подставляя найденные значения в уравнение (9.23), определяем значение параметра оптимизации в центре поверхности отклика, когда  $x_1 = 0$ .

$$Y_{S_{23}} = 0,888 \text{ л/мин.}$$

В виду того, что в уравнении (4.23) имеется парное взаимодействие ( $x_2x_3$ ), определяем угол поворота осей для исключения в каноническом уравнении парного взаимодействия.

$$\sin \alpha = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{b_{23}^2}{(b_{22} - b_{33})} + 1}} \right] = 0,179, \quad (10.26)$$

то есть  $\alpha = 10,26^\circ$ .

Тогда коэффициент в канонической форме будет следующий:

$$B_2 = -0,165, B_3 = 0,09.$$

Инварианты  $J_2 = -0,075$ ,  $J_3 = -0,075$

Уравнение регрессии в канонической форме примет вид:

$$Y_{23} - 0,888 = -0,165X_2^2 + 0,09X_3^2, \quad (10.27)$$

Или

$$\frac{X_2^2}{\frac{Y_{23} - 0,888}{-0,165}} + \frac{X_3^2}{\frac{Y_{23} - 0,888}{-0,09}} = 1. \quad (10.28)$$

Поверхность отклика - гиперболоид, а ее центр минимакс (рисунок 10.3).

Подставив различные значения отклика  $Y$  в канонические уравнения (10.16) получили семейство сопряженных изолиний (рисунок 9.4), когда  $x_3 = 0$ , т.е. значение положения уравнительной емкости находится в центре плана. Расположение элементов производительности в области эксперимента напоминало поверхность типа «эллипса». Центр эксперимента лежит за пределами области эксперимента. Максимальная производительность в данном случае будет при диаметре питательной трубки 3,334 мм и угле наклона питательной трубки  $\alpha = 64^\circ$ .

Рассмотрим аналогично двумерное сечение плоскостью  $X_1SX_3$  (рисунок 10.5), когда  $x_2 = 0$ , т.е. значение угла питательной трубки находится в центре плана. Расположение элементов производительности в области эксперимента напоминало поверхность типа «Сходящихся гребней». Из рисунка 4.5 можно сделать вывод, что изменение значения  $x_1$  в пределах эксперимента влияет на производительность по закону параболы, т.е. с увеличением диаметра питательной трубки и выше центра плана производительность падает, а при увеличении значения положения уравнительной емкости ( $x_3$ ) производительность возрастает (эффект напора).

Рассмотрим аналогично двумерное сечение  $X_2SX_3$  (рис. 9.6), когда  $x_1=0$ , т.е. значение диаметра питательной трубки находится в центре плана. Расположение элементов производительности в области эксперимента напоминало поверхность типа «Сходящихся гребней». Из рисунка 9.6 видно, что изменение значения ( $x_2$ ) в пределах эксперимента влияет на производительность также по закону параболы, т.е. с увеличением угла наклона питательной трубки относительно центра плана производительность падает, а при увеличении значения положения уравнительной емкости ( $x_3$ ) производительность возрастает.

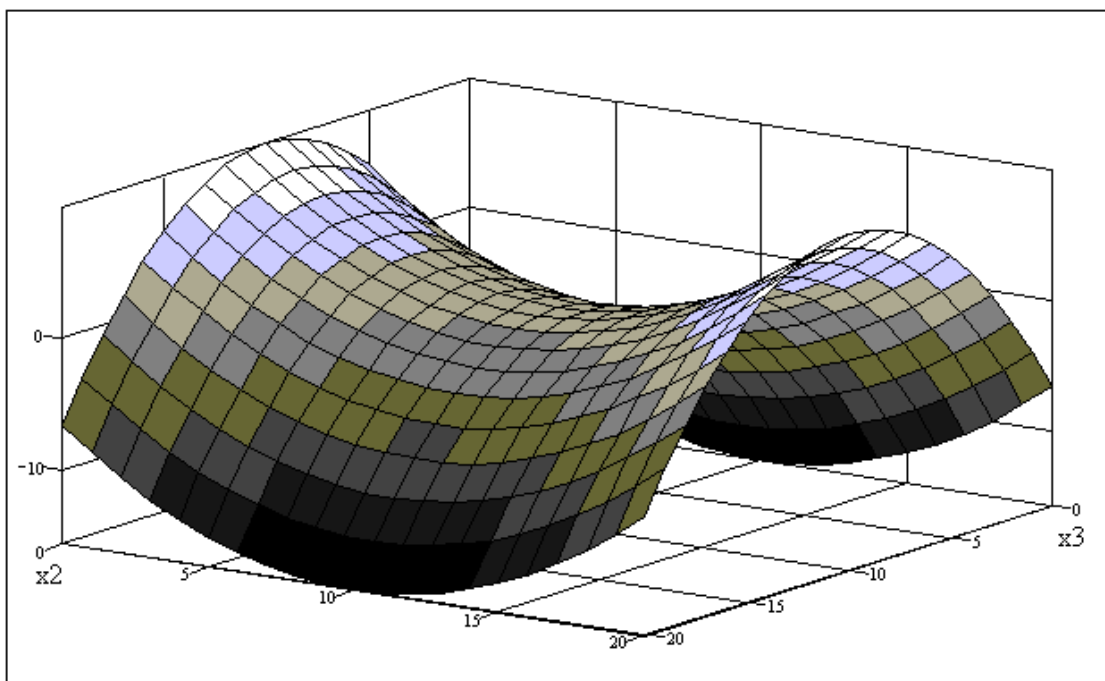


Рисунок 10.3 Поверхность зависимости производительности от угла наклона питательной трубки и положения уравнивающей емкости

Таблица 10.2 - Характеристика двумерных сечений поверхности отклика по производительности распылителя

Секущая плоскость	Коэффициенты центра сечения			Отклик в центре сечения $Y_{XS}$ , л/мин	Угол поворота оси координат $\alpha$ , град.
	$X_{1S}$	$X_{2S}$	$X_{3S}$		
$X_1 SX_2$	0,339	0,245	-	1,335	0
$X_1 SX_3$	0,339	-	-2,592	0,777	0
$X_2 SX_3$	-	0,85	-2,127	0,888	10,26

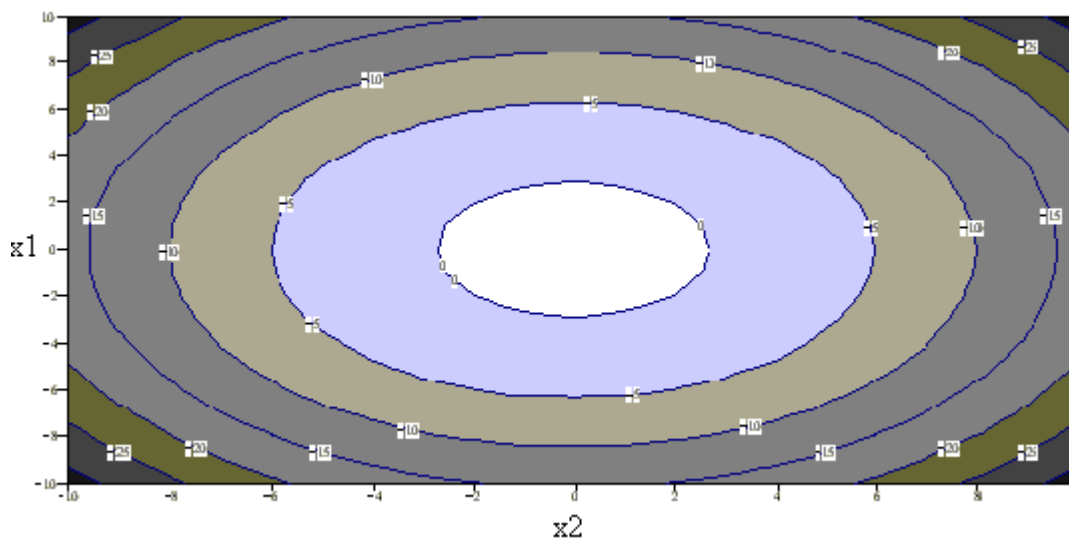


Рисунок 10.4 Двумерное сечение поверхности отклика по производительности плоскостью  $X_1SX_2$



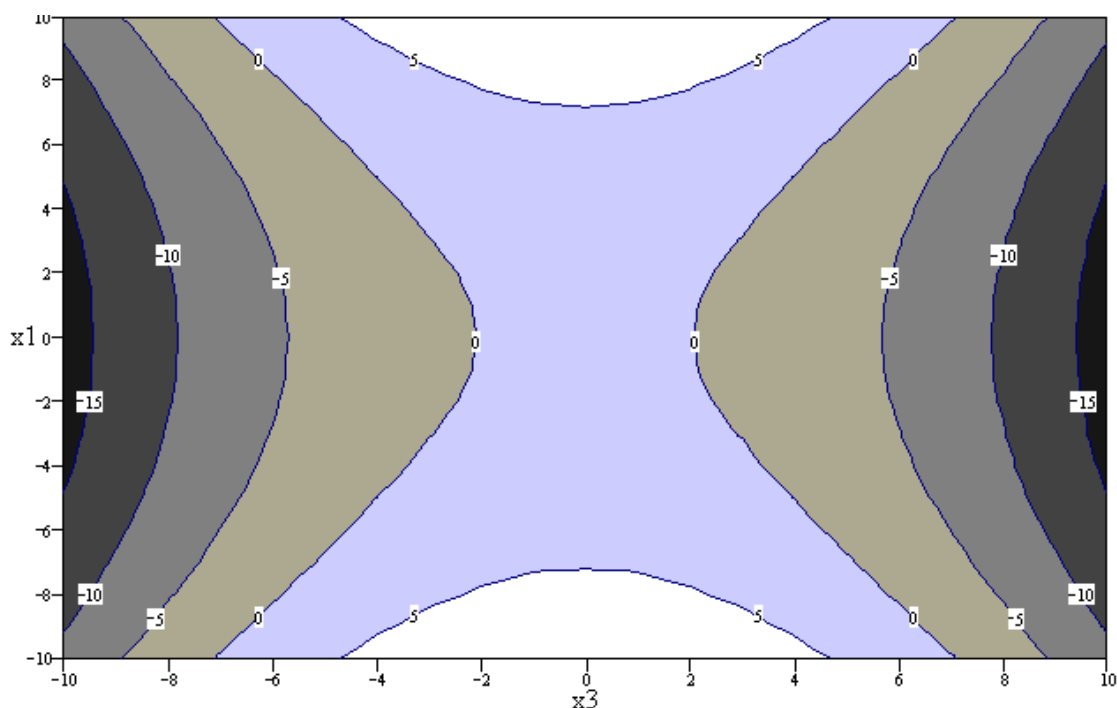


Рисунок 10.5 Двумерное сечение поверхности отклика по производительности плоскостью  $X_1SX_3$

#### 10.7.2 Распределение фракционного состава рабочей жидкости

Одним из важнейших факторов при оценке качества опрыскивания является размер капель. Установлено, что при химической обработке растений на объекте удерживаются капли размером 80-360 мкм.

Наряду с этим определяющим фактором при оценке качества опрыскивания является плотность покрытия, т.е. количество капель на  $1 \text{ см}^2$ . Распределение фракционного состава рабочей жидкости изучалось с использованием лабораторной полевой установки. В качестве жидкости использовали воду, окрашенную красителем.

Лабораторно-полевые испытания УМО проводили при обработке яблоневого сада в учхозе «Кубань» (акт внедрения см. приложение).

В качестве коллекторов применяли мелованную бумагу, при этом коэффициент распыления приняли  $K=1,21$ . Коллекторы были в виде прямоугольных лент, их размер составлял  $210 \times 297 \text{ мм}$ . Они были разложены по всей ширине захвата распылителя на заданном режиме работы. Расстояние между коллекторами составляло 200 мм.

Для анализа исследовались 1538 капель, размеры которых распределялись на 12 классов с интервалом в 50 мкм.

С помощью микроскопа МПБ-2 на коллекторах фиксировали следы капель размером от 50 до 100 мкм.

Данные микроскопирования и расчетов занесли в таблицу, на основании которой построили графики дифференциального распределения

фракционного состава распыленной жидкости (рисунок 10.7) и интегральные кривые (рисунок 10.8).

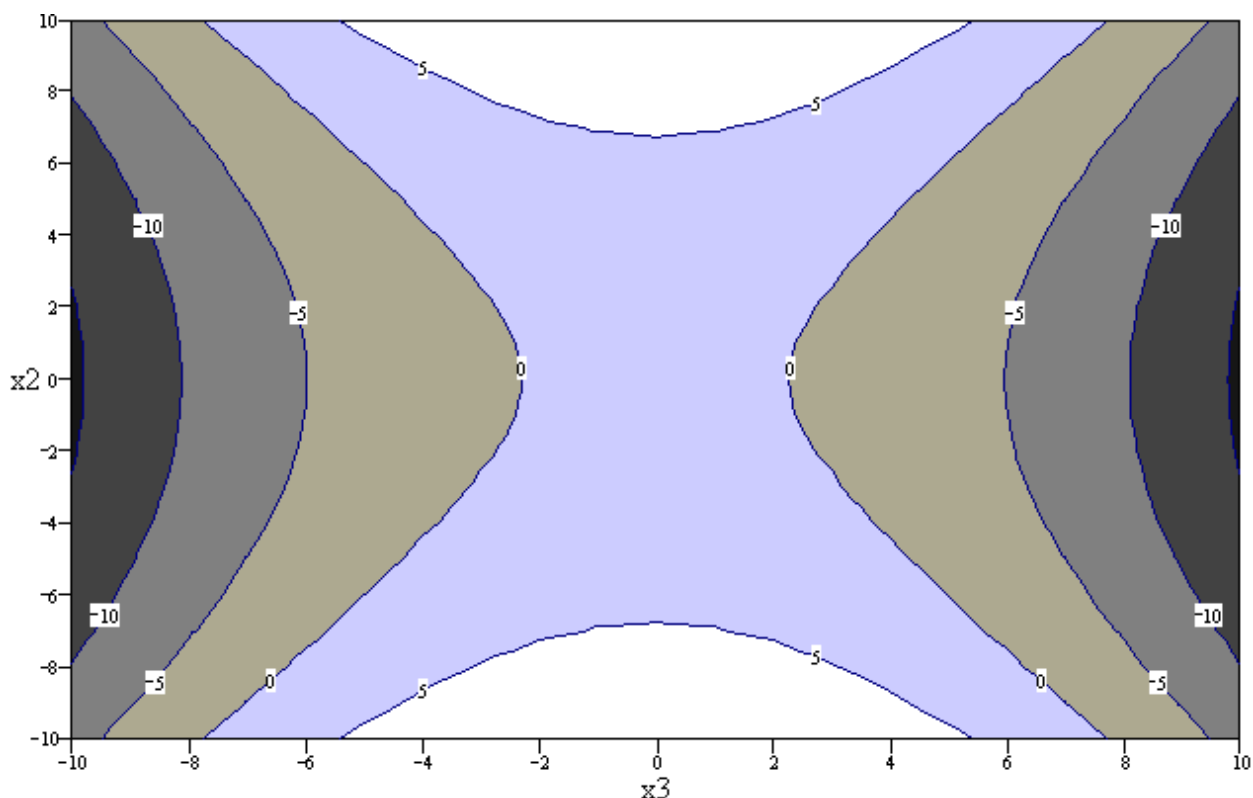


Рисунок 10.6 Двумерное сечение поверхности отклика по производительности плоскостью X2SX3

После обработки результатов микрофотографирования были определены необходимые показатели качества обработки объекта [75]:

медианно-массовый диаметр	- 170 мкм;
плотность покрытия	- 37 кап/см <sup>2</sup> ;
производительность распылителя	- 0,18 л/мин.

Анализируя дифференциальную и интегральные кривые распределения фракционного состава, можно сказать, что основная масса жидкости содержится в каплях с диаметрами от 100 до 220 мкм, что является наилучшим интервалом варьирования размера капель. Это подтверждается также исследованиями В.Ф. Дунского, А.В. Богданова.

При рассмотрении кривых распределения видно, что диаметр капель варьирует от 60 до 300 мкм. Медианно-массовый диаметр составил 170 мкм, что говорит о достаточном качестве распыла, так как при обработке

Степень использования весового количества рабочей жидкости составила 69 % и является достаточно высокой.

Таким образом, качественные показатели процесса опрыскивания предлагаемым устройством находится в пределах агротребований.

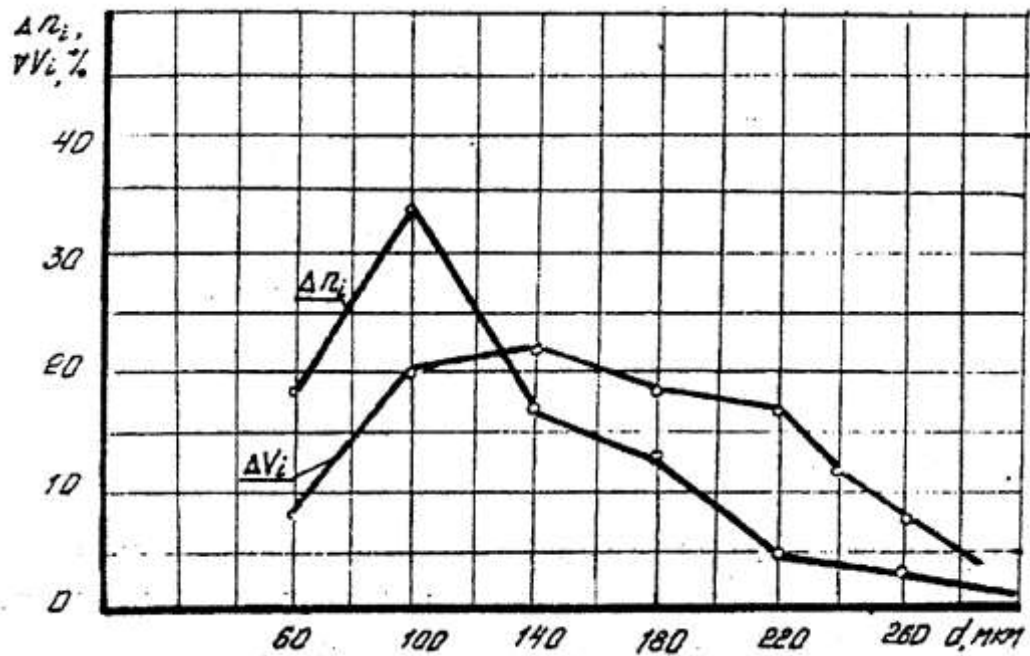


Рисунок 10.7 Дифференциальное распределение фракционного состава рабочей жидкости:  $n_i$  - удельное содержание;  $V_i$  - удельный объем.

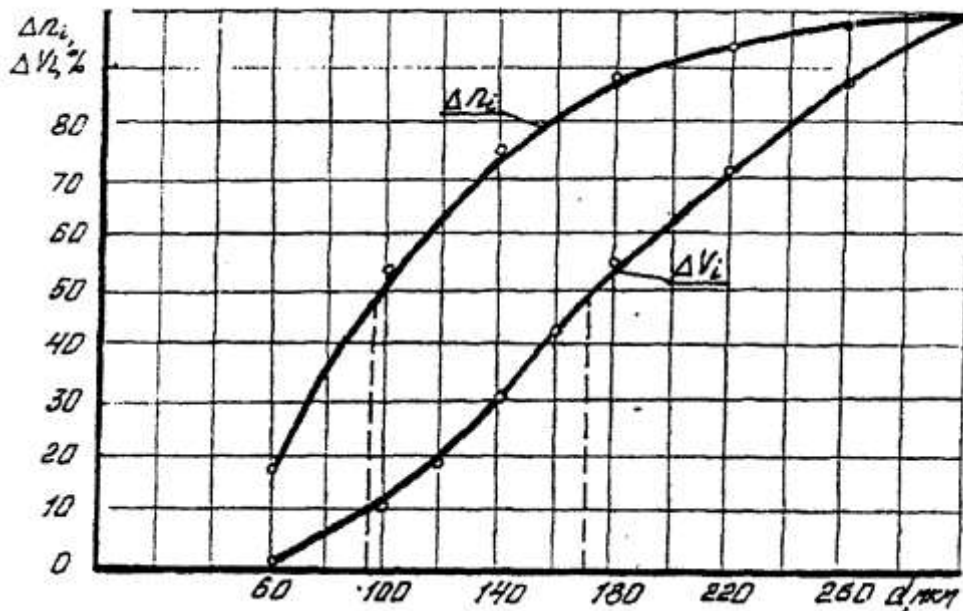


Рисунок 10.8 Интегральная кривая распределения фракционного состава рабочей жидкости:  $n_i$  - удельное содержание;  $V_i$  - удельный объем. пестицидами в целях предупреждения сноса капель и удержания их на растениях рекомендуется ММД от 100 до 250 мкм. Наличие капель, диаметр которых превышал 280 мкм, составляет не более 10 %.

### 10.7.3 Зависимость скорости воздуха от расстояния выходного отверстия сопла

#### 10.7.3.1 Зависимость скорости воздушной струи распылителя без вентилятора

Поскольку скорость воздушной струи распылителя и ее массовый расход обеспечивают определенную производительность распылителя, необходимо знать указанные параметры струи.

Сложность их определения связана с трудностью аналитических расчетов, так как в классической плоскопараллельной струе воздух подсасывается из корпуса коллектора, рабочие параметры которого могут быть определены экспериментальным путем.

Для исследования осевой скорости воздушной струи, создаваемой распылителем, была использована экспериментальная установка (рисунок 10.3) с нашим распылителем с верхней подачей рабочей жидкости таблица 10.3.

Таблица 10.3 Характеристика исследуемого распылителя

Давление воздуха $P$ , МПа	Ширина выходного отверстия сопла $b$ , мм	Толщина выходного отверстия сопла $a$ , мм	Расстояние от распылителя $L$ , м
0,12	5	0,35	0,1; 0,25; 0,54; 0,7

Замеры осевой скорости воздушной струи проводились на расстояниях  $L$ , приведенных в таблице 4.2, с использованием ручного анемометра (АРИ-49).

Результаты скорости воздушной струи распылителя приведены на рисунке (10.9).

На графике изображена экспериментальная кривая для распылителя, у которого целевой струйный элемент располагается внутри трубчатого корпуса.

Анализируя изменения скорости воздуха, можно отметить, что скорость воздушной струи составляет не менее 15 м/с на выходе из распылителя и снижалось до 1 м/с на расстоянии 1 м, а при  $L = 0,5$  м, составляя 6 м/с, что вполне достаточно для обработки полевых культур, но не достаточно для обработки садов и виноградников. В этой связи обоснована необходимость транспортирования созданного факела дополнительным воздушным потоком вентилятора.

#### 10.7.3.2 Зависимость скорости воздушного потока распылителя совместно с вентилятором.

Анализируя скорость воздушной струи распылителя, мы убедились, что для обработки садов и виноградников необходимо использовать

дополнительный источник воздуха - вентилятор, который будет выполнять транспортную функцию, перемещая рабочую жидкость на объект обработки.

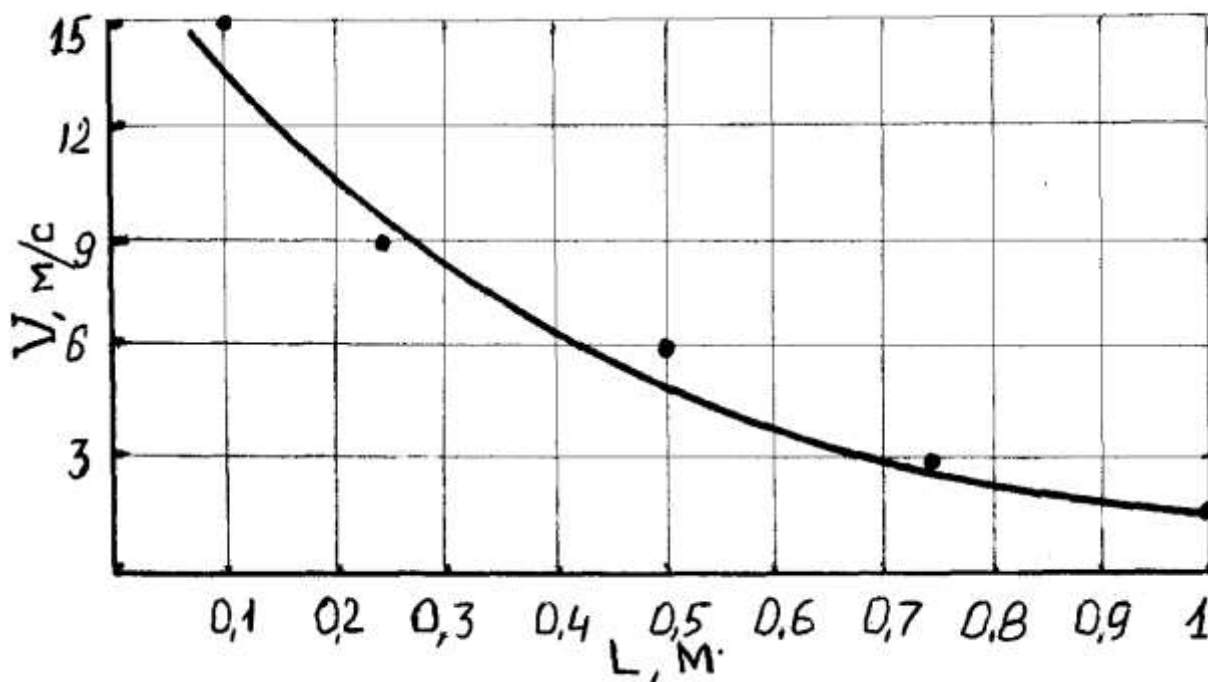


Рисунок 10.9 График зависимости скорости струи от расстояния до сопла

Для исследования осевой скорости воздушной струи, создаваемой вентилятором, была использована лабораторно-полевая установка вентиляторного эжекционно-щелевого УМО (рисунок 9.1) с установленными на ней распылителями, техническая характеристика которых приведена в таблице 10.2.

Замеры осевой скорости проводились на расстоянии ( $L$ ), которое находилось в интервале 1 - 10 м, через 1 м.

Скорость воздушной струи определена как работающим распылителем, так и без него.

Результаты скорости воздушной струи при различных режимах работы (с распылителем и без него) приведены на рисунке 10.10.

Анализируя изменение скорости воздуха, можно отметить, что скорость воздушного потока от вентилятора на выходе из трапециевидного сопла составляла 35 м/с и снижалась до 2 м/с на расстоянии 10 м, а при работающем распылителе - до 3 м/с на таком же расстоянии.

Это указывает на целесообразность использования такого опрыскивателя для обработки многолетних насаждений с междурядьями от 2 до 10 метров.

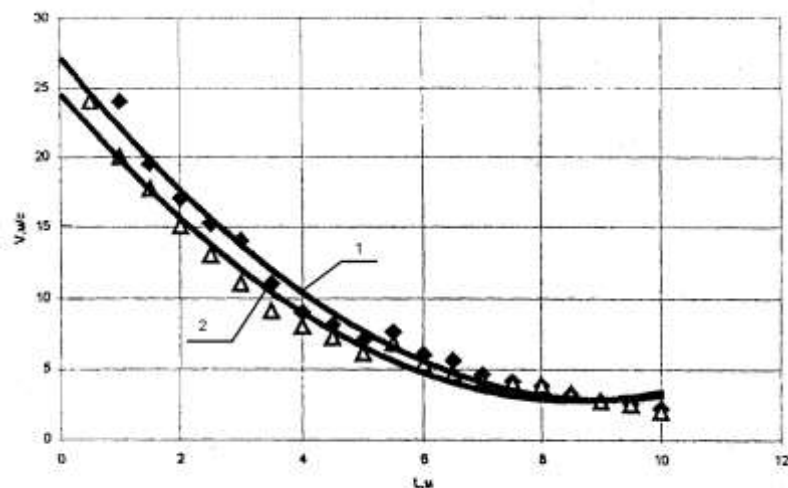


Рисунок 10.10 Графики зависимости скорости струи от расстояния до сопла: 1 - характеристика скорости воздушного потока вентилятора; 2 - характеристика скорости воздушного потока вентилятора и распылителя

#### 10.7.4 Влияние диаметра питательной трубки, угла ее наклона и положения уравнильной емкости на производительность распылителя

Анализируя построенные графики  $Y_{пр} = f(x_1)$  (рисунок 10.12) при постоянном значении положения уравнильной емкости  $x_3 = 0$  установили, что производительность растет по параболической зависимости, имея максимальные значения 0,6 до 1,35 л/мин для диаметра питательной трубки 3,4 мм в зависимости от угла наклона питательной трубки равной  $60^\circ$ .

Использование питательных трубок с диаметром выше 3,5 мм не увеличило производительность, что вызвано насыщением воздушной струи выходящей из сопла рабочей жидкости, при этом положение уравнильной ёмкости ( $x_3=0$ ) то есть уровень жидкости находится на одном уровне со срезом питательной трубки и процесс распыла происходит за счет эжектирования. Это приводит к увеличению сопротивления струи на выходе жидкости из питательной трубки в зону, где давление больше атмосферного.

Однако, учитывая, что для ультрамалообъемного опрыскивания целесообразно иметь малую производительность распылителя, а для предотвращения забивания выходных отверстий принимать диаметр не менее 2 мм, получим значение производительности  $Y_{пр} = 0,5$  л/мин.

В то же время аналогичную производительность можно получить при диаметре питательной трубки 4,5 мм.

Вышеуказанный вариант следует использовать при нанесении рабочей жидкости в виде суспензии или эмульсии для предотвращения забивания выходных отверстий питательных трубок распылителей.

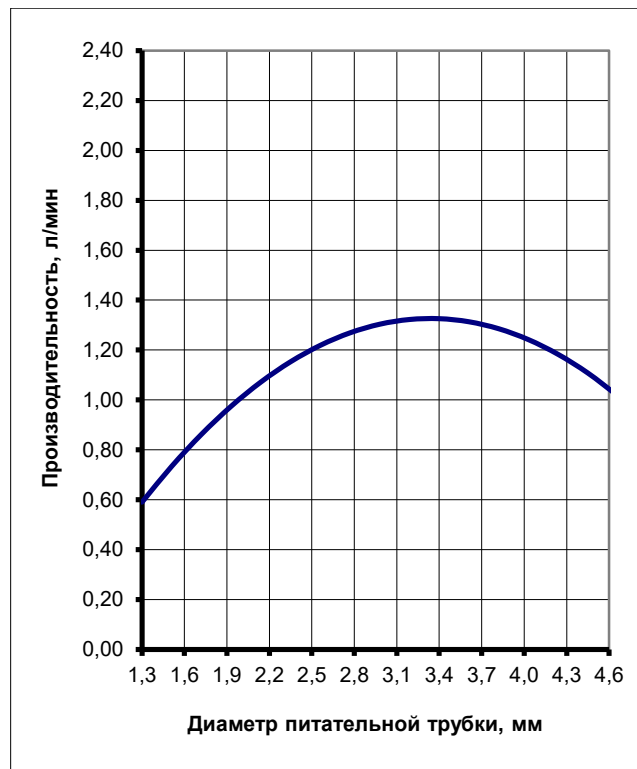


Рисунок 9.11 Зависимость производительности от диаметра питательной трубки

Кроме того, при увеличении угла наклона питательной трубки от  $35^{\circ}$  до  $60^{\circ}$  происходило увеличение производительности, вследствие совпадения и соответственно сложения векторов скоростей воздушной струи и рабочей жидкости, что объясняется значением угла наклона фаски питательной трубки ( $35^{\circ}$ ).

При дальнейшем увеличении угла наклона питательной трубки производительность распылителя падает.

Максимальная производительность  $Y_{np} = 1,35$  л/мин для диаметра питательной трубки  $d = 3,5$  мм имеет место при угле наклона питательной трубки  $\alpha = 60^{\circ}$ .

Анализируя графики зависимости производительности распылителя от положения уравнительной емкости  $Y_{np} = f(x_3)$  (рисунок 9.13) при  $x_2 = 60^{\circ}$  (угол наклона питательной трубки), установили, что производительность возрастает с увеличением значения  $x_3$  (максимум ее составил 2,25 л/мин) при положении уравнительной емкости, соответствующей значению звездной точки со знаком (+) 84 мм и диаметром питательной трубки  $d = 3$  мм значения производительности минимальны.

Следует отметить достаточно высокие эжекционные свойства распылителя, который при положении уравнительной емкости, соответствующем 60 мм, обеспечил минимальную производительность 0,2 л/мин, для диаметра выходного отверстия питательной трубки 1,3 мм, а для диаметра 3 мм - 0,9 л/мин, что несколько ниже для  $Y_{np} = 1$  л/мин, который

обеспечивал распылитель с диаметром 4,66 л/мин при нулевом положении уравнивательной емкости.

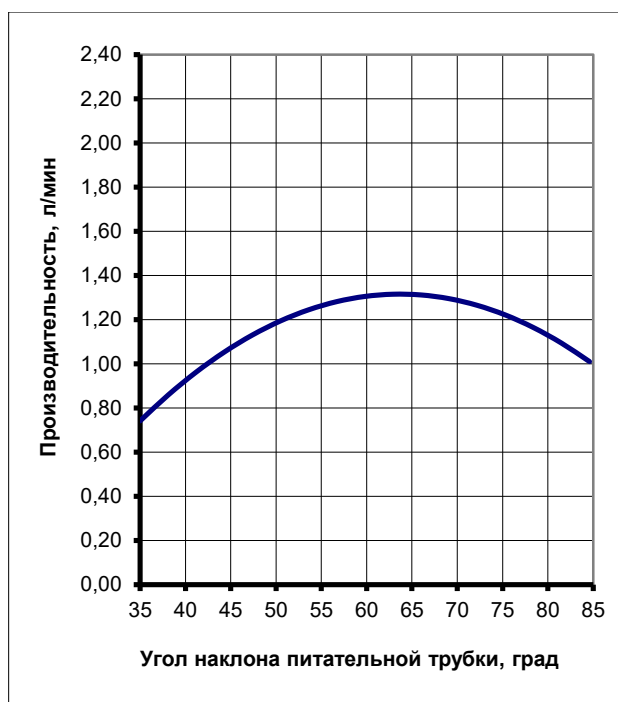


Рисунок 10.12 Зависимость производительности от угла наклона питательной трубки

Проведенный анализ показал широкие возможности при монтаже распылителя и уравнивательной емкости, обеспечивающие возможность задать необходимые параметры производительности распылителя.

Анализируя производительность распылителя от положения уравнивательной емкости при различных значениях угла наклона питательной трубки  $x_2$  от  $35^\circ$  до  $85^\circ$ , установили, что наибольшее значение  $Y_{np} = 2,25$  л/мин имели при  $x_2 = 60^\circ$ . Производительность возрастает с изменением  $x_2 = 35^\circ$  до  $60^\circ$ . А при  $x_3 = -84$  мм,  $x_1 = 3$  мм и  $x_2 = 35^\circ$  распылитель не работает -  $Y_{np} = 0$  л/мин. Производительность при  $x_3 = -84$ , но при  $x_2 = 45^\circ$   $Y_{np} = 0,42$  л/мин. При  $x_2 = 60^\circ$ ,  $Y_{np} = 0,8$  л/мин, а при  $x_2 = 85^\circ$   $Y_{np} = 0,8$  л/мин. Таким образом можно сделать вывод, что резкое увеличение производительности  $Y_{np}$  имеет место только при изменении углов наклона питательной трубки от  $35^\circ$  до  $60^\circ$ .



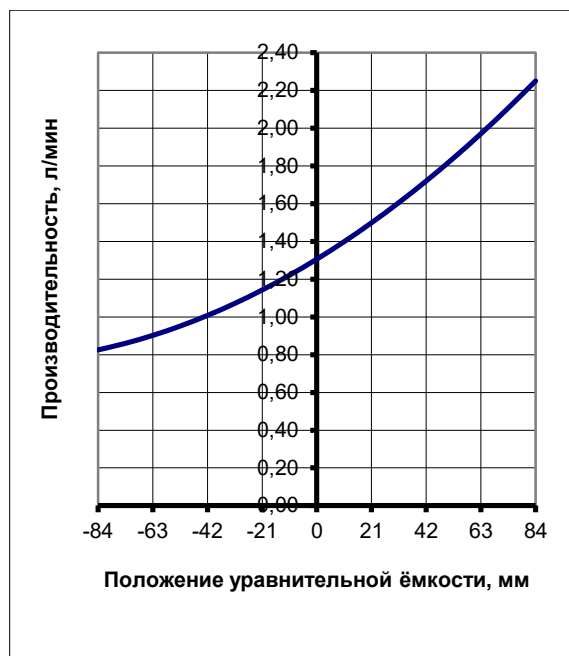


Рисунок 9.13 Зависимость производительности от положения уравнильной емкости

#### 9.7.5 Краткие выводы

1 В результате экспериментальных исследований обоснована технологическая схема УМО и установлено влияние управляемых факторов (диаметра питательной трубки, угла ее наклона и положение уравнильной емкости) на величину производительности распылителя.

2 С использованием планирования трехфакторного эксперимента по ЦКРУП определены оптимальные параметры распылителя и режимов его работы при условии выполнения агротехнических требований к качеству обработок. Согласно полученному уравнению регрессии по критерию максимальной производительности распылителя оптимальный диаметр питательной трубки составил 3 мм, угол наклона ее к корпусу распылителя  $60^{\circ}$ , высота расположения уравнильной емкости относительно распылителя 84 мм.

3 Анализ дифференциальных и интегральных кривых распределения фракционного состава капель позволяет установить, что основная масса рабочей жидкости содержится в каплях диаметром от 100 до 220 мкм. Размеры капель варьируют в интервале 60...300 мкм, а медианно-массовый диаметр составляет 170 мкм. Плотность покрытия предлагаемым распылителем составляет в среднем 37 капель на  $1 \text{ см}^2$ .

4 Скорость воздушной струи струйного элемента распылителя составляет на его выходе 15 м/с и снижается до 1 м/с на расстоянии от него 1 м, что достаточно для обработки полевых культур, а для садов и виноградников требуется дополнительный воздушный поток вентилятора.

5 Скорость воздушного потока от вентилятора на выходе из трапецевидного сопла составляет 35 м/с и снижается до 2 м/с на расстоянии 10 м, а при работающем распылителе до 3 м/с на таком же расстоянии. Следовательно предлагаемая технологическая схема УМО обеспечивает обработку многолетних насаждений с междурядьем от 2 до 10 м.

6 Увеличение диаметра питательной трубки при неизменных других факторах ведет к росту производительности распылителя: 2,25 л/мин при диаметре 3 мм и 0,6 л/мин при диаметре 1.5 мм. Увеличение диаметра питательной трубки выше 3 мм при постоянных значениях других факторов приводит к снижению производительности за счет снижения эжекции.

7 Производительность распылителя при  $\alpha_2=60^\circ$  и диаметра питательной трубки 3 мм возрастает с увеличением высоты расположения уравнильной емкости ( $x_3$ ). Максимальное значение производительности составило при этом 2,25 л/мин.

8 В зависимости от угла наклона питательной трубки к горизонту максимальное значение производительности распылителя 2,25 л/мин имеет место при угле  $60^\circ$ . При этом диаметр питательной трубки составляет 3 мм, а положение уравнильной емкости 84 мм.

## 11 Оптимизация параметров и режимов работы приспособления для опрыскивания приствольных зон в садах

### 11.1 Программа экспериментальных исследований

Цель экспериментальных исследований – проверить достоверность теоретических разработок. Это касается процесса распределения жидкости и нанесения ее на объект обработки, плотности покрытия, равномерности ее распределения и определения оптимальных значений конструктивных параметров рабочих органов опрыскивателя для обработки приствольных зон деревьев.

Программой экспериментальных исследований предусматривалось выполнение следующего объема работ.

1. Экспериментальное определение оптимального значения размера щелевого отверстия питательной трубки пневматического распылителя.

2. Исследование оптимального значения конструктивных размеров воздушного щелевого сопла распылителя.

3. Исследование производительности распылителя и таких качественных показателей, как плотность покрытия обрабатываемого объекта каплями, их медианно массовый диаметр (ММД), и равномерности распределения капель на объекте обработки.

4. Исследование скоростной характеристики воздушной струи из щелевого сопла распылителя.

5. Исследование оптимального значения угла установки поворотного устройства (щупа) относительно штамба.

6. Исследование физико-механических свойств рабочей жидкости.

7. Исследование агрофона приствольных зон многолетних насаждений.

8. Выбор и обоснование плана второго порядка, для обработки данных планового эксперимента.

### 11.2 Экспериментальная установка, приборы и аппаратура, применяемые в исследованиях

Для проведения лабораторных и полевых исследований была изготовлена специальная установка, с помощью которой можно было работать на стационаре в лаборатории (рисунок 11.1) и производить полевые испытания.



Рисунок 11.1 - Лабораторно-полевая (вверху) и полевая установка (внизу), и пневматический щелевой распылитель в работе

Технологическая схема устройства (рисунок 11.2) включает раму 1, на которой смонтирован резервуар 2 с рабочей жидкостью, навеску 3, источник сжатого воздуха 4, ресивер 5, регулятор давления 6, воздушный коллектор 7, расходный кран 8, уравнительную емкость 9, коллектор 10, пневматический щелевой распылитель 11, поворотное устройство 12 и фартук 13.

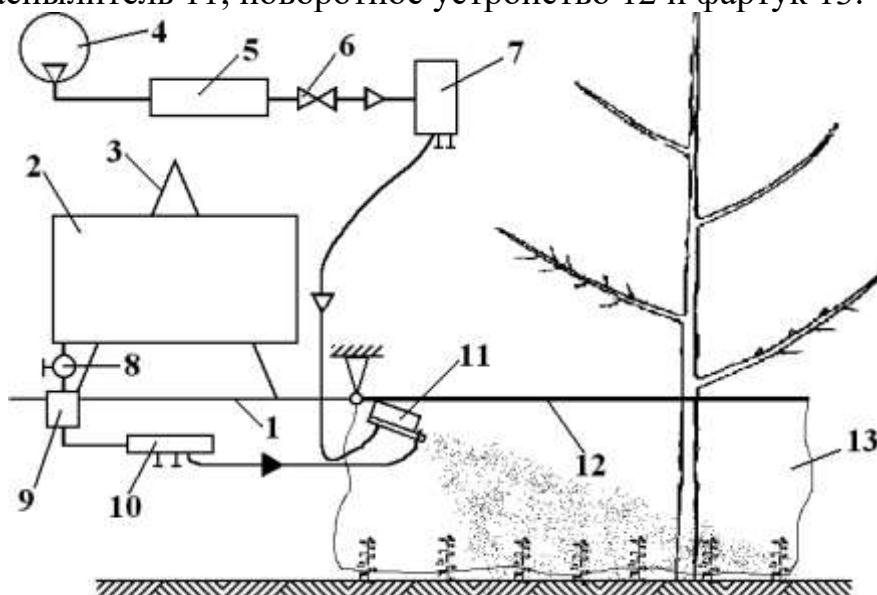


Рисунок 11.2 - Схема устройства для обработки приствольных зон.

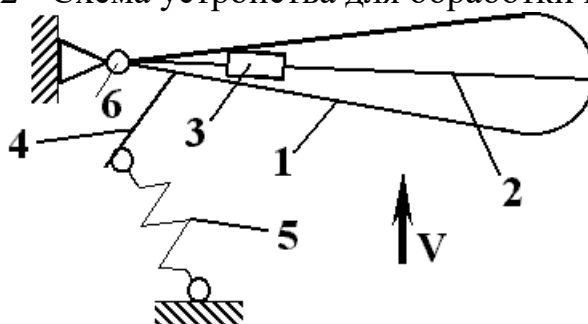


Рисунок 11.3 - Схема поворотного устройства:

1-щуп; 2-планка; 3-распылитель; 4-рычаг; 5-пружина; 6-шарнир; V-направление движения.

Работает устройство следующим образом. Воздух от источника сжатого воздуха через ресивер 5, регулятор давления 6, воздушный коллектор 7 подводится к распылителю 11. Рабочая жидкость из резервуара 2 поступает через кран 8 и уравнительную емкость 9 по питательным трубопроводам в щелевую питательную трубку распылителя 11, где диспергируется воздухом, поступающий из воздушно-щелевого сопла распылителя и подается на объект обработки.

Техническая характеристика

Емкость бака	Л	50
Ширина захвата	М	0,7
Количество распылителей	шт.	1
Объем уравнительной емкости	Л	1,0
Рабочая скорость	км/ч	5,0

Рабочее давление воздуха	Мпа	0,15
Габаритные размеры:		
длина	М	2,0
ширина	М	1,05
высота	М	0,2
Масса	Кг	10,5

### 11.3 Общая методика экспериментальных исследований

При исследовании полидисперсной системы капель, образованных в результате дробления жидкости, наиболее точные результаты дает вероятностно-статический метод анализа.

Примеры статистической обработки результатов наблюдений или исследований широко применяются в технике при изучении массовых явлений, при проведении полевых опытов в сельском хозяйстве [65, 66, 31, 71, 72].

В большинстве случаев изучаемый вариационный ряд состоит из наблюдаемых величин или признаков, распределенных по классам, где в качестве средней используется среднеарифметическое значение величины или признака. Это характерно для капельного спектра струйных распылителей, которые характеризуются среднеарифметическим диаметром капель и распределением их по линейным размерам [73, 74, 77, 82, 44].

Достаточно полную характеристику струи дает распределение весов или объемов жидкости, заключенных в каплях каждого класса размеров, а в качестве средних принимается медианно-массовый диаметр  $d_m$ , медианно-численный диаметр  $d'_m$  и средне-объемный диаметр  $d_v$ .

### 11.4 Частные методики экспериментальных исследований

#### 11.4.1 Исследование производительности распылителя.

Исследования проводили в зависимости от следующих факторов:

- размера щели питательной трубки  $S$ , мм;
- высоты воздушного сопла  $h$ , мм;
- ширины воздушного сопла  $H$ , мм.

Для исследования расхода рабочей жидкости использовали лабораторную установку (рисунок 11.4), состоящую из распылителя, включенного в пневмомагистраль от компрессора и жидкостную магистраль, связанную с питающей емкостью в виде мерного стакана.

Заборный шланг подключали к мерному стакану. Включив компрессор, открывали кран подачи воздуха к струйному элементу распылителя и устанавливали давление, равное 0,15 Мпа, а угол наклона распылителя  $60^\circ$  относительно горизонта (давление и угол определены по предварительным экспериментам, учитывая ширину захвата и качество покрытия поверхности). Пользуясь секундомером, определяли расход рабочей жидкости  $q$ .

Каждый замер при заданных параметрах рабочего органа (распылителя) производили в трехкратной повторности [65].

Конструктивные параметры распылителя выбраны на основании предварительных опытов и исследований [65]:

- размер щели питательной трубки  $S=1$  мм; 2 мм; 3 мм;
- высота воздушного сопла  $h=0,15$  мм; 0,30 мм; 0,45 мм;
- ширина воздушного сопла  $H=8$  мм; 9 мм; 10 мм.

#### 11.4.2 Исследование качества обработки объекта.

Характеристика распределения плотности покрытия определяется по количеству капель и по массе рабочей жидкости. Плотность покрытия поверхности объекта каплями рабочей жидкости является одним из качественных показателей обработки объекта. Под плотностью покрытия понимается количество капель на объекте обработки на площади в  $1 \text{ см}^2$  [72, 74].

Качество обработки объекта определяли на лабораторной установке (рисунок 11.4), которая представляла собой ленточный транспортер, приводимый в действие электродвигателем через редуктор. Транспортерная лента натянута на двух барабанах, закрепленных на сварной раме. Один барабан является ведущим, а второй натяжным. На раме транспортера с помощью кронштейна с хомутом закреплен распылитель, факел которого можно направлять под необходимым углом к ленте транспортера, для изменения ширины захвата. Скорость движения транспортерной ленты  $V=5$  км/ч (исходя из условий исходных требований).

Обрабатываемую поверхность имитировали коллекторами, которые закрепляли на ленте транспортера перпендикулярно факелу распыла распылителя в горизонтальной плоскости, на расстоянии  $0...1,2$  м от распылителя напротив оси факела. Эксперимент проводился в 3-х кратной повторности. Коллекторы получали соответствующие номера. Затем коллекторы обрабатывались с целью определения степени покрытия поверхности рабочей жидкостью и ММД.

Для анализа полученных результатов была разработана методика определения степени покрытия поверхности рабочей жидкостью с помощью ЭВМ.

Методика определения степени покрытия поверхности рабочей жидкостью с помощью ЭВМ (патент № 2290693).

Известны различные способы и методики определения качественных и количественных показателей процесса опрыскивания. Так, например, известен и применяется фотометрический способ анализа. При этом способе используется устройство из фотометрической насадки, лентопротяжного механизма, прибора для обработки осциллограмм и осциллографа с блоком питания и блока питания осветителя. Однако, определение масштаба показаний осциллографа очень сложно т.к. связано с микрокопированием лент с изображением отложений рабочей жидкости на обрабатываемой поверхности. Кроме того, устройство для фотометрического способа анализа

требует индивидуального изготовления, к тому же сам осциллограф допускает значительную ошибку измерений.

Наиболее часто используется микроскопический метод анализа качества опрыскивания. Он заключается в подсчете капель после опрыскивания на поверхности специальных подложек (предметные стекла, коллекторы из мелованной бумаги и др.) с минимальным растеканием на них капель, с помощью окулярной линейки микроскопа.

Однако этот метод очень трудоёмкий и недостаточно точный т.к. зависит от качества и точности визуальной оценки.

Техническим решением задачи является повышение точности и сокращение рабочего времени контроля степени покрытия поверхности.

Поставленная задача достигается тем, что в способе определения степени покрытия поверхности рабочей жидкостью, коллектор с нанесёнными на ней каплями переносят в компьютер путем сканирования, получают исходные данные в виде файла, который сохраняют с расширением bmp черно-белого изображения и преобразуют с помощью оператора READBMP программы MathCAD в матрицу, (размер которой задается размером изображения, а каждый элемент этого массива соответствует пикселу исходного изображения и имеет значение кода плотности черного цвета от 0 до 255) в которой коллектор и капли на ней выражают в пикселях, затем определяют общее количество пикселей и количество черных пикселей, и по отношению их определяют степень покрытия поверхности рабочей жидкостью [84, 86].

Пример конкретного осуществления способа определения степени покрытия поверхности рабочей жидкостью состоит в том, что коллектор со следами капель подкрашенной рабочей жидкости предварительно ксерокопируются с целью получения более четкого черно-белого отпечатка исследуемой поверхности, затем коллектор сканируют планшетным сканером с разрешающей способностью не ниже, чем 600 dpi на 1 дюйм (размер пикселя  $25,4/600=0,042$  мм – точность измерения). Получают файлы исходных данных в виде черно-белого изображения, которые запоминают под собственными номерами коллекторов с расширением bmp, затем по программе, написанной в MathCAD, используя оператор READBMP превращают исходное изображение в матрицу, в которой коллектор и капли на ней выражены в пикселях. Цифра (0) в матрице на рисунке 2 означает пиксель черного цвета, а цифра (255) - пиксель белого цвета. Если подсчитать сумму чисел в матрице и разделить на 255 получится общее количество белых пикселей, зная размер матрицы определим общее количество пикселей. Разница между ними будет равна общему количеству черных пикселей, дальше рассчитывают степень покрытия поверхности коллектора по соотношению общего количества черных пикселей к общему количеству пикселей в процентах.

На рисунке 11.5 дано реальное размещение капель на коллекторе, а на рисунке 11.6 математическая модель в виде фрагмента матрицы.



Для нашего случая в матрице  $M_{i,j}$  ( $i$  – строка,  $j$  – столбец )  $M_{75,18}=255$  – пиксель белого цвета, а  $M_{75,19}=0$  - пиксель черного цвета. Используя, операторы  $rows(M)$  и  $cols(M)$  программы MathCAD, определим количество строк и столбцов в матрице:

$$ni := rows(M) \quad ni := 1.104 \cdot 10^3 \quad nj := cols(M) \quad nj := 996 \quad Sob := ni \cdot nj \quad Sob := 1.1 \cdot 10^6$$

Перемножая их значения получим общее количество пикселей занимающих коллектор. Определяем количество белых пикселей, для этого суммируем все цифры в матрице  $M$  и полученную сумму разделим на 255 пиксель белого цвета:



Рисунок 11.5 - Реальное размещение капель на коллекторе

	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
67	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
68	255	255	255	255	255	255	255	255	255	0	0
69	255	255	255	255	255	255	255	255	255	0	0
70	255	255	255	255	255	255	255	255	0	0	0
71	255	255	255	255	0	255	255	255	0	0	0
72	255	255	0	0	0	0	0	0	0	0	0
73	255	0	0	0	0	0	0	0	255	255	0
74	255	0	0	0	0	0	0	0	0	255	255
75	255	0	0	0	0	0	0	0	0	255	255
76	255	255	0	0	0	0	0	0	255	255	255
77	255	255	255	255	0	0	0	0	0	255	255
78	255	255	255	255	255	255	0	0	0	255	255
79	255	255	255	255	255	255	255	0	255	255	255
80	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255

Рисунок 11.6 - Математическая модель в виде фрагмента матрицы

$$S := \begin{cases} ZZ \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..ni-1 \\ \quad \text{for } j \in 0..nj-1 \\ \quad \quad ZZ \leftarrow ZZ + M_{i,j} \end{cases} \quad S := 2.3860310^8$$

$$Sb := \frac{S}{255} \quad Sb := 9.35710^5$$

Разность общего количества пикселей и количества белых пикселей составит количество пикселей черного цвета, а отношение последних к общему количеству пикселей в процентах определяет степень покрытия объекта:

$$Sch := Sob - Sb \quad Sch := 163885 \quad Sp := 100 \cdot \frac{Sch}{Sob} \quad Sp := 14.904 \%$$

Степень покрытия объекта обработки для нашей модели составила 14,904%.

Для подтверждения преимуществ предлагаемого способа мы сравнили его точность определения степени покрытия объекта обработки (фрагмент коллектора см. рисунок 11.5) с обычным методом микрофотографирования и получили следующие результаты (таблица 11.1).

Таблица 11.1. - Сравнительная оценка степени покрытия объекта каплями

Повторность замера	Степени покрытия при сканировании, %	Степени покрытия при микрофотографировании, %
1	14,900	16,3
2	14,908	11,9
3	14,904	13,2
Среднее значение	14,904	13,8
Дисперсия	0,000016	5,11
Стандартное отклонение	0,004	2,26
Коэффициент вариации, %	0,02684	16,38
Ошибка опыта	0,00231	1,31
Точность опыта, %	0,0155	9,45

Как видно из данной таблицы, предлагаемый нами способ дает значительно большую точность оценки по сравнению с прототипом, который занижает достоверность оценки. Разница между вариантами существенная: коэффициент Стьюдента табличный составляет в нашем опыте 0,846, а расчетный 2,776.

При каждом эксперименте плотность покрытия подсчитывали в 9 местах, выбранных по ширине захвата струи через равные промежутки. На основании данных, внесенных в таблицу, определяли:

- зависимость степени покрытия от расстояния;
- коэффициент вариации, то есть равномерность распределения капель.

11.4.3 Распределение фракционного состава капель по размеру так же, как и плотность покрытия объекта, определяет качество обработки.

Для исследования распределения капель была предложена методика распределения спектра капель [55]. На каждом объекте капли измеряли и классифицировали по классам размера при этом использовали микроскоп с 24-ти кратным увеличением (рисунок 11.5).

Каждый класс характеризовали минимальным размером капель в классе -  $r_{i_{\min}}$ , максимальным -  $r_{i_{\max}}$  и средним размером -  $r_i = \frac{r_{i_{\min}} + r_{i_{\max}}}{2}$ ,

где  $d_r = r_{i_{\min}} - r_{i_{\max}}$ ,  $d_r$  - ширина интервала размеров капель в классе. Если  $d_r$  постоянно по всей выборке, то данные исследования будут более надежными.

Ширина интервала была соразмерна со значением наиболее вероятного радиуса  $r_0$  в распределении:  $d_r = (0,2 \div 0,3)r_0$ . Наиболее вероятный радиус  $r_0$  соответствовал максимуму кривой распределения по классам размеров капель или медианно-массовому радиусу:  $r_0 = r_m$ . Необходимое число интервалов  $N = 8 \div 16$ . Толщина распыла характеризовалась средним диаметром капель жидкости, учтенных на поверхности коллекторов. Средний диаметр следа капли вычисляли по формуле:

$$d_{m_c} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (11.1)$$

На коллекторе, для установления распыла определяли две самые крупные капли, принадлежащие к общему спектру капель. Эффективный диаметр капель исчисляли из найденного диаметра капли, определенного с использованием фактора распространения:

$$d_{if} = \sqrt{\frac{0,78(d_{m_{max}} + 2r)^2}{\pi}} \quad (11.2)$$

где  $d_{m_{max}}$  - максимальный диаметр следа капли;

$r$  - зона эффективного действия,  $r = 100 \dots 200$  мкм.

Медианно-массовый диаметр:

$$d_m = \frac{d_{if}}{2.2} \quad (11.3)$$

где 2.2 – эмпирический фактор.

Диаметр следа капли

$$D_i = \frac{D_{n_i} + D_{k_i}}{2} \quad (11.4)$$

где  $D_{n_i}$  - диаметр следов капель в начале  $i$ -го класса;

$D_{k_i}$  - диаметр следов капель в конце  $i$ -го класса.

С учетом коэффициента растекания вычисляли средний диаметр капли

$$d_i = \frac{D_i}{k} \quad (11.5)$$

Суммируя все капли в размерных группах  $N = \sum n_i$ , подсчитывали густоту покрытия

$$n_c = \frac{N \cdot 10^8}{f_c} \quad (11.6)$$

где  $f_c$  - вся анализируемая поверхность.

В каждом классе вычисляли объем капель:

$$v_i = 0.524d_i^3 n_i . \quad (11.7)$$

Подсчитывали суммарный объем всех капель:

$$v = \sum v_i . \quad (11.8)$$

Величины удельного содержания  $\Delta n_i$  и удельного объема  $\Delta v_i$  каждого класса.

$$\Delta n_i = \frac{n_i}{N} 100\% \quad \Delta v_i = \frac{v_i}{V} 100\% . \quad (11.9)$$

Величины  $\Delta n_i$  и  $\Delta v_i$  использовали при построении графиков – характеристик распыла и при вычислении медианно-массового и медианно-объемного диаметров.

Для построения графика распределения капель по оси абсцисс откладывали средние диаметры капель в классе  $d_i$ , а на оси ординат – удельное содержание капель определенного размера  $\Delta n_i$ .

Построив дифференциальную кривую доверительной вероятности, получили график распределения капель по размерам

При каноническом преобразовании уравнения второго порядка [8] производился перенос начала координат в новую точку  $S$  и поворот старых осей на некоторый угол в факторном пространстве. Для этого продифференцировали функцию отклика по каждой переменной и, приравняв к нулю частные производные, решали полученную систему уравнений. Решением системы  $n$ -линейных уравнений находили координаты оптимума. В случае двух независимых переменных, придавая различные фиксированные значения переменным, получали серию изолиний на плоскости, на основании которых проводился анализ уравнения регрессии [14, 56, 8].

После канонического преобразования и определения вида поверхности отклика проводили ее анализ с помощью двухмерных сечений.

Для этого в модель подставляли нормализованные значения всех факторов кроме двух. В полученном выражении определяли центр поверхности отклика путем взятия частных производных по каждому фактору и приравнивания полученных выражений к нулю и строили полученную поверхность [61, 70, 79, 81].

Придавая различные значения критерию оптимизации, строили серию кривых равного выхода (изолиний) в области допустимых значений варьирования независимых переменных. По кривым сечений судили об изменении величины критерия оптимизации в зависимости от натуральных значений рассматриваемых факторов.

Таким образом, выбрали параметры, характеризующие процесс высоко дисперсионного опрыскивания объекта и рассмотрели математические

выражения для их вычисления. Рассмотрели методику обработки экспериментальных данных (регрессионного анализа) при использовании матриц симметричного композиционного плана типа Вк и разработали программу регрессионного анализа для ЭВМ, которая не только рассчитывает коэффициенты уравнения регрессии, а проводит проверку на значимость полученных коэффициентов по критерию Стьюдента, проверяет на адекватность полученной модели по критерию Фишера, затем данная модель преобразуется в каноническую форму и строятся поверхности отклика, для анализа полученных результатов.

### 11.5 Методика изучения агрофона

Для определения геометрических размеров рабочего органа, высоты установки его относительно земли и определение площадей обработанных дважды и не обработанной был изучен агрофон многолетних насаждений.

С этой целью исследовали: отклонения деревьев от оси ряда, отклонение расстояния деревьев в ряду, высоту штамба и его диаметр.

Шнуром отбивали центр ряда и рулеткой измеряли отклонения деревьев от оси ряда (от шнура до центра штамба), расстояние между деревьями в ряду и высоту штамба также измеряли рулеткой, а средний диаметр вычисляли, измерив, швейным сантиметром длину окружности на его высоте и поделив измерение на 3,14.

При проведении замеров нужно знать объем выборки. Его определяли так, чтобы выборочная средняя характеризовала изучаемый параметр с заданной точностью.

Для больших совокупностей объем выборки вычисляли по формуле (11.10): [26].

$$n = \left( \frac{t \cdot v}{S_{\bar{x}}} \right)^2, \quad (11.10)$$

где  $n$  – объем выборки;

$t$  – критерий Стьюдента;

$v$  – коэффициент вариации;

$S_{\bar{x}}$  – планируемая ошибка выборочной средней.

При 95 % уровне вероятности и бесконечном числе свободы степеней свободы  $t$  выбирали равным 1,96, вариация признака  $v$  в большинстве случаев составляет 10...20 %. Принимая достаточную точность данных опытов 2...4, и взяв промежуточные значения двух последних параметров, получили:

$$n = \left( \frac{1,96 \cdot 15}{3} \right)^2 = 96,04$$

Число повторностей приняли не менее 100.

После проведения всех замеров они были обработаны по известным методам математической статистики и определены: среднее значение, стандартное отклонение, ошибка выборочной средней, коэффициент вариации, относительная ошибка и построены полигоны эмпирических распределений.

#### 11.6 Методика проведения лабораторно-полевого опыта

Лабораторно-полевые опыты проводились на установке (рисунок 11.7 – верхние), на площадке закрепляли вертикально стержень разного диаметра, имитирующий штаб. Площадка передвигалась по направлению движения агрегата со скоростью 5 км/ч, а сам опрыскиватель находился на месте. Вокруг стержня укладывалась мелованная бумага. При работе распылителя подкрашенная рабочая жидкость наносилась на эту бумагу для оценки качественных показателей работы опрыскивателя при разных углах установки поворотного устройства. Опыты проводились в трехкратной повторности с целью определения не обработанной и дважды обработанной поверхностью в зависимости от диаметра штаба, с целью определения оптимального угла установки поворотного устройства.

#### 11.7 Методика проведения полевого опыта

Полевые опыты проводились на установке (рисунок 11.7 – нижние), на делянке по диагонали в приштабовой зоне накладывалась рамка (не менее 10 раз) размером 0,5 на 0,5 метра на землю покрытую сорняками, фотографировалось, затем сорняки в рамке подсчитывались, путем удаления механическим путем и определялся их вид. После проведения обработки гербицидами опять накладывалась рамка, фотографировалась, затем не уничтоженные сорняки в рамке подсчитывались, путем удаления механическим путем и определялся их вид и проводился расчет качества обработки по известной методике [26].

Определение площадей обработки гербицидами в приствольной зоне (математическая модель).

Для определения площадей двукратной обработки и не обработанной поверхности гербицидами в приствольной зоне с целью нахождения конструктивных параметров поворотного устройства выполненного в виде петли, в дальнейшем именуемым щупом, строим график траектории движения (схема щупа рисунок 2.2). Траекторию движения щупа при воздействии на штаб дерева определяем графо-аналитическим методом.

Поскольку щуп (АВ рисунок 2.9) совершает поступательное и вращательное движение вокруг штамба дерева, то его траектория складывается из трёх траекторий соответствующих трём углам установки щупа, определяющих три этапа обработки:



Рисунок 11.7 - Определение качества обработки с помощью рамки

#### 11.8 Методика определения физико-механических свойств рабочей жидкости

Плотность и поверхностное натяжение определялось по известной методике способу отрыва капли.

1 этап – касание штамба щупом (начальный угол установки щупа к направлению движения  $\alpha$ ), до установки на угол  $\alpha_1$  (угол при котором конец щупа начинает скользить по штамбу);

2 этап – скольжение конца щупа (т.А), по штамбу до момента прекращения воздействия на штамб (т.А<sub>2</sub>) и поворот его на угол  $\alpha_2$ ;

3 этап – установка щупа в исходное состояние на первоначальный угол  $\alpha$ .

Анализ графического изображения траектории щупа при движении вокруг штамба (рисунок 2.9) дает представление о процессе обработки поверхности гербицидами при опрыскивании.

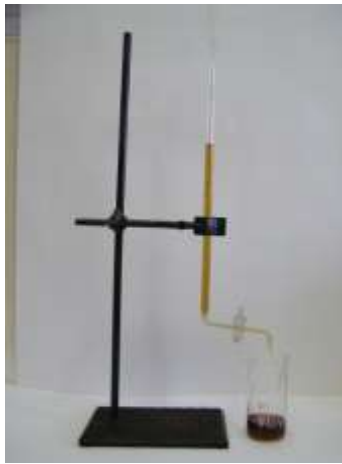


Рисунок 11.8 - Определение поверхностного натяжения рабочей жидкости по способу отрыва капли

На первом этапе часть приствольной зоны обрабатывается с перекрытием, а в третьем – остается необработанная площадь.

В соответствии с различными траекториями движения, в процессе воздействия щупа на штамп происходит изменение направления воздушно-капельной струи, вследствие чего изменяется расход рабочей жидкости и соответственно и обрабатываемая площадь.

Определить отклонение фактической нормы расхода рабочей жидкости от заданной на разных участках в приствольной зоне возможно замером площадей, обрабатываемых с перекрытием и необработанной.

2.8.2 Определение геометрических размеров щупа и угла установки, при котором конец его начинает скользить по штамбу.

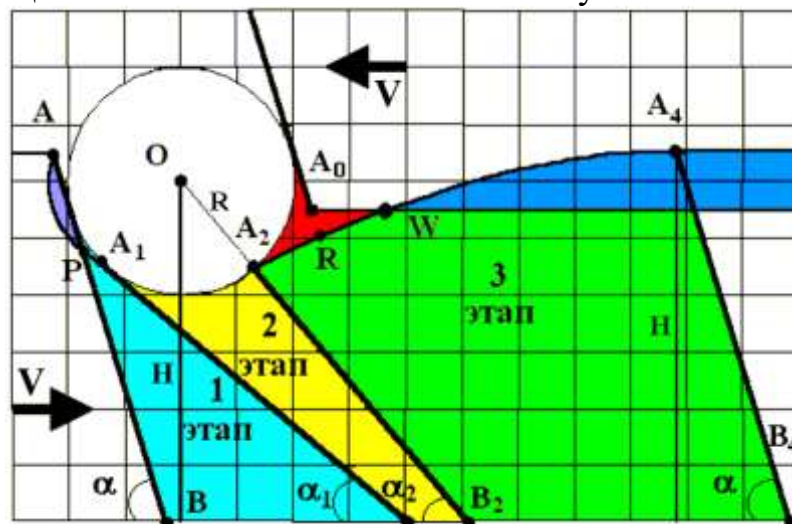


Рисунок 1.9 - Зоны, образуемые при обработке устройства со следящей системой

точка O – цент штампа дерева;

точка B – шарнир щупа на раме;

точка A – конец щупа установленного под углом  $\alpha$  с учётом половины величине перекрытия зоны OF обработки при прямом и обратном ходе;



OC – расстояние от центра штамба до траектории точки В (связанной с агрегатом);

OD – радиус штамба.

V – скорость (направление движения).

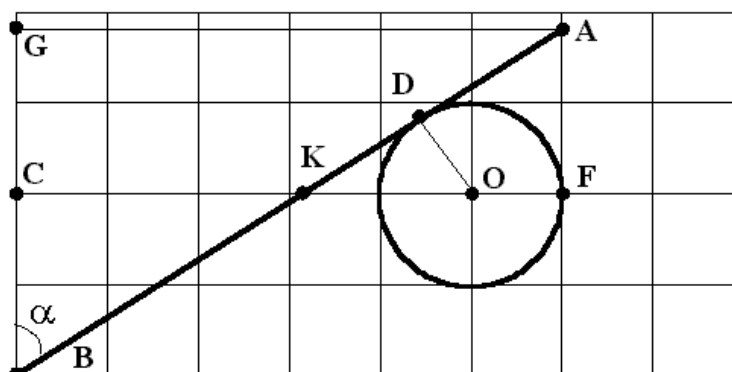


Рисунок 2.10 - Исходное положение щупа в момент касания штамба:  
2.8.2.1 Определение размера щупа.

Размер щупа с учетом угла  $\alpha$  установки его к штамбу, расстояние OF – половина зоны перекрытия и расстояние OC – обрабатываемая поверхность в приствольной зоне определяется по формуле

$$AB = (OC + OF) / \sin \alpha. \quad (11.12)$$

Для нахождения траектории движения на 1 этапе определили координаты точки А (AG;AF) относительно линии OC, проходящей через центр штамба перпендикулярно направлению движения.

Из  $\Delta ABG$  получили  $GB = AB \cdot \cos \alpha$ . Так как  $\Delta СКВ$  подобен  $\Delta КДО$  то  $\angle DOK = \alpha$ , а  $DO = OK \cdot \cos \alpha$  откуда  $OK = DO / \cos \alpha$  и  $KC = OC - OK = OC - OD / \cos \alpha$ .

Из рисунка 2.10 следует,

$$\text{что } AF = GC = GB - CB, \quad (11.13)$$

тогда из  $\Delta ABG$   $GB = AB \cdot \cos \alpha$ .

$$(2.56)$$

Для нахождения BC рассмотрели  $\Delta КСВ$ . Так как  $KC / CB = \tan \alpha$ , то  $CB = KC / \tan \alpha$ . Подставив значения KC получили

$$CB = \frac{OC - \frac{OD}{\cos \alpha}}{\tan \alpha} = \frac{OC \cdot \cos \alpha - OD}{\sin \alpha},$$

подставив значение GB и CB в (2.55) получили

$$AF = GC = GB - CB = AB \cdot \cos \alpha - \frac{OC \cdot \cos \alpha - OD}{\sin \alpha}, \quad (11.14)$$

где  $AB = \frac{CO + OF}{\sin \alpha}$ .

Выражение (11.14) окончательно приняло вид

$$AF = \frac{OC + OF}{\sin \alpha} \cdot \cos \alpha - \frac{OC \cdot \cos \alpha - OD}{\sin \alpha}, \quad (11.15)$$

$$AG = OC + OF, \quad (11.16)$$

Имея ввиду выражения (2.65) и (2.66) координаты точки А приняли вид

$$т.А\left(\frac{CO + OF}{\sin \alpha} \cdot \cos \alpha - \frac{OC \cdot \cos \alpha - OD}{\sin \alpha}, OC + OF\right). \quad (11.17)$$

Заменяя геометрические выражения и приняв:

OC = H – расстояние от центра штамба до шарнира рабочего органа;

OD = R – радиус штамба;

OF =  $\frac{z_p}{2}$  – половина зоны перекрытия;

AB = L – длина щупа.

Получили

$$т.А\left(L \cdot \cos \alpha - \frac{H \cdot \cos \alpha - R}{\sin \alpha}, H + \frac{z_p}{2}\right). \quad (11.18)$$

Рассмотрим положение щупа, при котором он начинает скользить по штамбу, если угол наклона его составит  $\alpha_1$  (см. рисунок 2.11).

2.8.2.2 Определение угла наклона  $\alpha_1$ :

из рисунка 2.11 следует

$$OC = OK_1 + K_1C; \quad OK_1 = \frac{OA_1}{\cos \alpha_1}; \quad K_1C = K_1B_1 \cdot \sin \alpha_1; \quad K_1B_1 = A_1B_1 - A_1K_1$$

$$K_1C = (A_1B_1 - A_1K_1) \cdot \sin \alpha_1; \quad A_1K_1 = \frac{A_1O}{\operatorname{ctg} \alpha_1}.$$

Подставив значения  $OK_1$  и  $K_1C$  получили

$$OC = \frac{A_1O}{\operatorname{ctg} \alpha_1} + (A_1B_1 - \frac{A_1O}{\operatorname{ctg} \alpha_1}) \cdot \sin \alpha_1, \quad (11.19)$$

Решив (2.62) получили

$$CO \cdot \cos \alpha_1 = OA_1 - A_1B_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1 - OA_1 \cdot \sin^2 \alpha_1, \quad (11.20)$$

Заменяя геометрические выражения и приняв

OA<sub>1</sub> = R – радиус штамба;

A<sub>1</sub>B<sub>1</sub> = L – длина щупа;

получили

$$H \cdot \cos \alpha_1 = R - L \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1 - R \cdot \sin^2 \alpha_1. \quad (11.21)$$

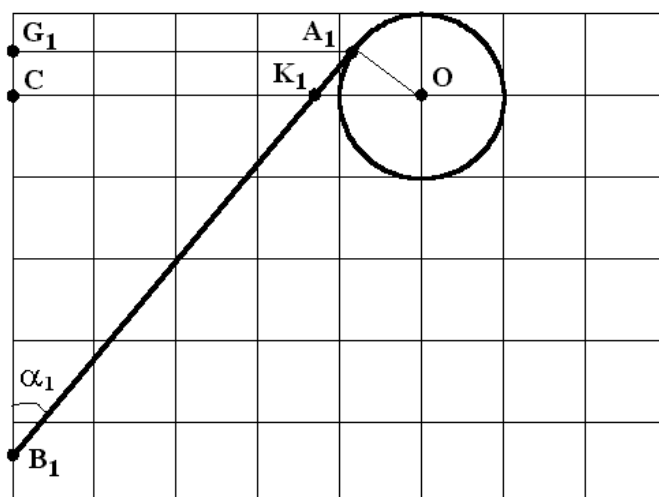


Рисунок 11.11 - Расположение шупа относительно штамба в момент начала обхода (скольжения) по штамбу дерева

Для нахождения угла  $\alpha_1$  провели преобразование уравнения 11.21.

$$H \cdot \left( \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2}} \right) + R \cdot \left( \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2}} \right) - L \cdot \left( \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2}} \right) \cdot \left( \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2}} \right) = R,$$

$$\frac{H \cdot (1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2}) \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2})}{(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2})^2} + \frac{4 \cdot R \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2}}{(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2})^2} - \frac{2 \cdot L \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} \cdot (1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2})}{(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2})^2} = R$$

$$H \cdot (1 - \operatorname{tg}^4 \frac{\alpha_1}{2}) + 4 \cdot R \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2} - 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}^3 \frac{\alpha_1}{2} =$$

$$= R \cdot (1 + 2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2} + \operatorname{tg}^4 \frac{\alpha_1}{2})$$

Получили

$$H - H \cdot \operatorname{tg}^4 \frac{\alpha_1}{2} - R \cdot \operatorname{tg}^4 \frac{\alpha_1}{2} + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}^3 \frac{\alpha_1}{2} + 4 \cdot R \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2} - 2 \cdot R \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2} -$$

$$- 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} - R = 0$$

Приняв,  $x = \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}$ , уравнение приняло вид

$$(-H-R) \cdot x^4 + 2 \cdot L \cdot x^3 + 2 \cdot R \cdot x^2 - 2 \cdot L \cdot x + (H-R) = 0,$$

или

$$((-H-R) \cdot x^2 + 2 \cdot L \cdot x + (-H+R)) \cdot (x^2 - 1) = 0 \quad (11.22)$$

Решив уравнение 2.65, получили

$$\begin{aligned}
x_1 &= 1; \\
x_2 &= -1; \\
x_3 &= \frac{-L - \sqrt{L^2 - H^2 + R^2}}{-H - R}; \\
x_4 &= \frac{-L + \sqrt{L^2 - H^2 + R^2}}{-H - R}.
\end{aligned} \tag{11.23}$$

Зная значение  $x_i$  из (11.23) определили значение угла  $\alpha_1$

$$\begin{aligned}
1) \alpha_1 &= 2 \cdot \operatorname{arctg} 1 & \alpha_1 &= 90^0; \\
2) \alpha_1 &= 2 \cdot \operatorname{arctg} -1 & \alpha_1 &= -90^0; \\
3) \alpha_1 &= 2 \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{-L - \sqrt{L^2 - H^2 + R^2}}{-H - R} \right); \\
4) \alpha_1 &= 2 \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{-L + \sqrt{L^2 - H^2 + R^2}}{-H - R} \right),
\end{aligned} \tag{11.24}$$

После анализа остается одно значение угла, так как при первом значении  $\alpha_1=90^0$ , при втором равен  $-90^0$ , что не может быть т. к. при этом значении угла щуп расположен перпендикулярно движению агрегата, при третьем угол равен  $(180^0-\alpha_1)$  – т.е. значение угла  $\alpha_1$  при обратном ходе щупа, остается четвертое значение по которому определяется угол  $\alpha_1$  – формула 2.67.

Зная координаты точки  $A_1(G_1A_1, G_1C)$  - конца щупа при котором он начинает скользить по штамбу многолетнего насаждения (рисунок 2.11) и угол наклона  $\alpha_1$ , получили значение точки  $A_1(L \cdot \sin \alpha_1, R \cdot \sin \alpha_1)$  заданной параметрически.

11.8.3 Определение траектории движения точки А в диапазоне от угла  $\alpha$  до угла  $\alpha_1$ .

Для определения площади двукратной обработки гербицидами около штамбового пространства построим траекторию движения щупа из точки А до точки  $A_1$ , т.е. в диапазоне от момента касания штамба до того момента когда конец щупа начинает скользить по штамбу многолетнего насаждения, при этом происходит изменение угла  $\alpha$  (начального) до  $\alpha_1$  (2.67).

Для этого построили промежуточное положение щупа (рисунок 2.12) под углом  $\alpha_3$ , значение которого находится в пределах  $\alpha_1 \leq \alpha_3 \leq \alpha$  и определили координаты точки  $A_3(A_3G_3, G_3C)$  для определения функции траектории при дальнейшем использовании этих координат, заданных параметрическими.

Проекцию щупа  $A_3B_3$  на ось  $y$  и проекцию конца щупа  $G_3C$  на ось  $x$  определили графически (рисунок 2.12)

$$A_3G_3 = A_3B_3 \cdot \sin \alpha_3. \tag{11.25}$$

Из рисунка 11.12 следует, что

$$G_3C=B_3G_3-B_3C; \quad B_3G_3= A_3B_3 \cdot \cos\alpha_3; \quad OK_3=OD_3/\cos\alpha_3;$$

$$CK_3=CO- OK_3; \quad B_3C= CK_3/\operatorname{tg}\alpha_3.$$

$$G_3C= A_3B_3 \cdot \cos\alpha_3 - (CO - OD_3/\cos\alpha_3) / \operatorname{tg}\alpha_3 \quad (11.26)$$

Произведя замену в выражении (11.26) на соответствующие, принятые ранее обозначения, получили координаты точки  $A_3$

$$A_3(L \cdot \sin \alpha_3, L \cdot \cos \alpha_3 - \frac{H \cdot \cos \alpha_3 - R}{\sin \alpha_3}), \quad (11.27)$$

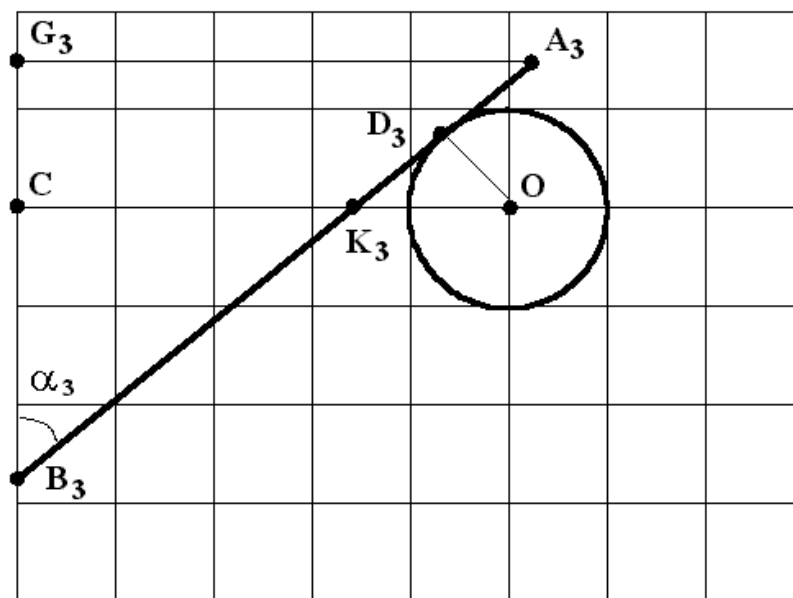


Рисунок 2.12 - Положение щупа в момент обхода штамба

Для нахождения функции движения конца щупа при обратном ходе, разбили диапазон изменения угла от  $\alpha$  до  $\alpha_1$  на 11 частей с целью получения 12 координат точек  $A_i$ , которые вычислялись подстановкой, разных значений текущего угла  $\alpha_3$  в (формулу 11.27) для аппроксимации.

Значения координат конца щупа заносили в вектора  $VX$  и  $VY$ , затем по функции  $\operatorname{linfit}(VX, VY, F)$  программы Mathcad 2000, который возвращает вектор коэффициентов линейной регрессии общего вида, заданной функцией второго порядка, где вектор  $F$  записывается в символьном виде  $(1, x, x^2)$ .

После аппроксимации получили уравнение вида  $y=a \cdot x^2+b \cdot x+c$ , при котором среднеквадратичная погрешность приближения «облака» исходных точек, коэффициенты которых хранятся в векторах  $VX$  и  $VY$ , оказывается минимальной.

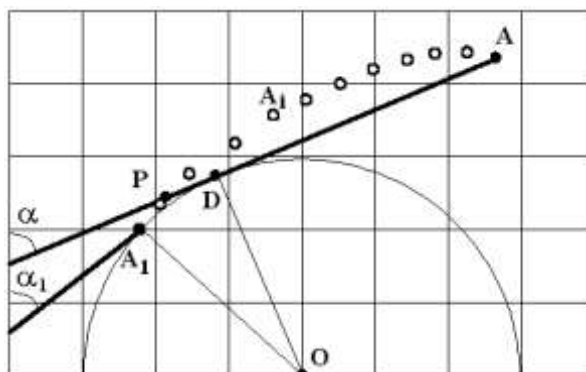


Рисунок 11.13 - Положения конца щупа (точек  $A_i$ ) при обходе штамба от угла  $\alpha$  до угла  $\alpha_1$

При расчете используя Matcad 2000 по программе «Площади обработки вокруг штамба многолетних насаждений», (см. приложение 5).

После нахождения коэффициентов уравнения обратного хода щупа ( $a = K_2$ ,  $b=K_1$  и  $c=K_0$ ), подставляли значения точек  $A_i$  в полученное уравнение, нашли сумму квадратов отклонений для расчета дисперсии и проверили на адекватность полученную функцию.

11.8.4 Определение площади двукратной обработки гербицидами около штамбовой зоны.

Площадь двукратной обработки заключается между дугой  $AP$  проходящей через точки  $A_i$  и начальным положением щупа  $AB$ , установленным под углом  $\alpha$ .

Для определения площади двукратной обработки гербицидами около штамбовой зоны определили один из пределов интегрирования, для этого вычислили координаты точки  $P$  пересечения касательной к штамбу  $AB$ , под начальным углом установки  $\alpha$  и аппроксимированной функцией уравнения движения обратного хода щупа, проходящей по дуге  $AP$  через точки  $A_i$ , вторым пределом интегрирования приняли значение ординаты конца щупа (точки  $A$ ).

Площадь двукратной обработки вычислялись по (11.27) с использованием программы разработанной нами для ПЭВМ (приложение 5).

Общий вид закономерности покрытия поверхности при двукратной обработке имел вид

$$S = \int_{x_{k1}}^{x_1} (K_2 \cdot x^2 + K_1 \cdot x + K_0) dx - \int_{x_{k1}}^{x_1} \left( \frac{x}{\operatorname{tg} \alpha} + b_1 \right) dx, \quad (11.28)$$

где  $S$  – площадь двукратной обработки около штамбовой зоны;

$x_1$  – значение ординаты конца щупа (точки  $A$ );

$x_{k1}$  – значение ординаты точки  $P$ ,

$K_2, K_1, K_0$  – коэффициенты аппроксимированной функции уравнения движения обратного хода щупа;

$b_1 = (H \cdot \cos \alpha - R) / \sin \alpha$ .

11.8.5 Определение не обработанной площади гербицидами около штамбовой зоны.

Не обработанная площадь около штамбовой зоны образуется при подходе щупа к штамбу, а также при выходе щупа из зоны его контакта со штамбом (см. рисунок 2.14).

Для определения не обработанной площади гербицидами около штамбовой зоны определили функцию движения конца щупа при выходе его из зоны контакта со штамбом и пределы интегрирования.

Из рисунка 2.14 следует, что не обработанная площадь представляет фигуру  $A_2LD_0A_0RWA_2$ , площадь которой определили по следующей формуле

$$S_{no} = \int_{CE}^{CF_0} f(\cup A_2WR) - \int_{CE}^{CF_0} f(\cup A_2LD_0) + \int_{CF_0}^{CN} f(A_0B_0) - \int_{CF_0}^{CN} f(\cup A_2LD_0) \quad (11.29)$$

где  $W$  – точка пересечения дуги  $A_2WR$  и продолжение  $A_0B_0$ :

При малых значениях  $OA_2$  – (размер штамба), пределы интегрирования принимают другие значения, так как в этом случае точка  $W$  это пересечение  $\cup A_2WR$  и прямой  $A_0B_0$ , и уравнение 2.72 примет вид

$$S_{no} = \int_{CE}^{TW} f(\cup A_2WR) - \int_{CE}^{TW} f(\cup A_2LD_0) + \int_{TW}^{CN} f(A_0B_0) - \int_{TW}^{CN} f(\cup A_2LD_0) \quad (11.30)$$

Направление движения щупа указано на рисунке 11.14 стрелками.

Для нахождения не обработанной площади около штамбовой зоны по уравнениям (11.29) и (11.30) определили функцию движения рабочего органа по дуге  $A_2WR$ .

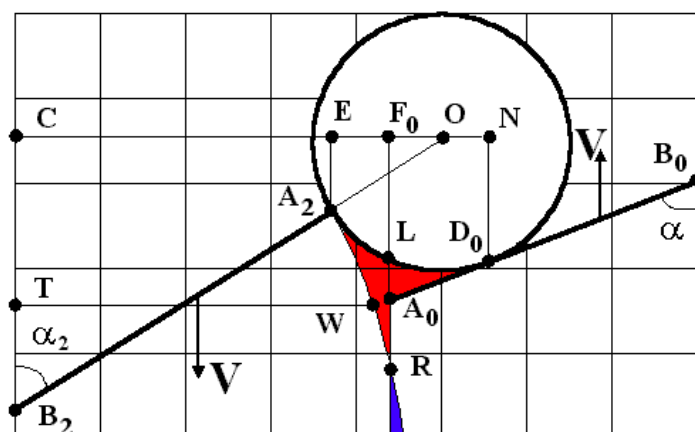


Рисунок 11.14 - Не обработанная площадь около штамбовой зоны

Во время обхода штамба щуп устанавливается под углом  $\alpha_2$ , после чего срабатывает механизм раскрытия, который устанавливает щуп на первоначальный угол  $\alpha$ .

11.8.6 Угол возврата в исходное положение ( $\beta$ ).

Угол возврата в исходное положение  $\beta$  определили разностью начального угла  $\alpha$  и  $\alpha_2$ .

При движении рабочего органа от точки  $A_2$  до точки  $A_4$  промежуточные значения точки  $A_j$  описывается траекторией движения по дуге с радиусом  $A_2B_2$ , одновременно двигаясь со скоростью агрегата в штамбовой зоне за время  $tr$ , (рисунок 2.15), образуя траекторию (дуга  $A_2WR$ ).

11.8.7 Определение время возврата в исходное положение рабочего органа.

Время возврата в исходное положение рабочего органа определили при движении от угла  $\alpha_2$  до угла  $\alpha$ , задаваясь значениями скорости агрегата  $V_p$  и расстоянием  $CC_4$ , которое пройдет агрегат от центра штамба до места когда рабочий орган установится в первоначальное положение под углом  $\alpha$  (рисунок 2.15).

Для рассматриваемого случая время возврата щупа в исходное положение имеет вид

$$tr = \frac{CC_4 - (A_2B_2 + OA_2) \cdot \cos\alpha_2 + A_2B_2 \cdot \cos\alpha}{V_p}, \quad (11.30)$$

где  $tr$  – время установки рабочего органа от угла  $\alpha_2$  до начального угла  $\alpha$ , с;  
 $V_p$  – рабочая скорость агрегата, м/с.

Подставляя значения в (2.74), получили

$$tr = \frac{CC_4 - (L + R) \cdot \cos\alpha_2 + L \cdot \cos\alpha}{V_p} \quad (11.31)$$

Для определения функции движения рабочего органа по дуге  $A_2WR$ , задали координаты точек  $A_j$  параметрически  $A(x_j, y_j)$

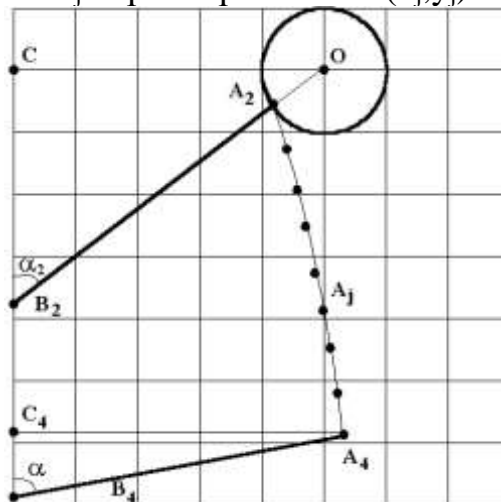


Рисунок 11.15 - Траектория движения щупа во время возврата в исходное положение

$$x_j = A_2B_2 \cdot \sin(\alpha_2 + \Delta\beta), \quad (11.32)$$



$$y_j = (OA_2 + A_2B_2) \cdot \cos \alpha_2 - A_2B_2 \cdot \cos(\alpha_2 + \Delta\beta) + \frac{\Delta\beta \cdot V_p \cdot tr}{\beta}, \quad (11.33)$$

где  $\Delta\beta$  - приращение угла возврата в исходное положение, град ( $0 \leq \Delta\beta \leq \beta$ ).

Перемещения конца щупа при возврате в исходное положение находим сплайн - аппроксимацией. При ней исходная функция заменена отрезками полиномов, проходящих через три смежные узловые точки. Коэффициенты полиномов рассчитывались так, чтобы первая и вторая производные были непрерывными.

Применяя кубический сплайн,  $cspline(X,Y)$  определили функцию движения рабочего органа по дуге  $A_2WR$ , (см. приложение 5).

Затем по уравнениям (11.32) или (11.33) определили не обработанную площадь около штамбовой зоны.

Расчет вели, используя Matcad 2000 по программе «Площади обработки вокруг штамба многолетних насаждений».

Задаваясь диаметром штамба -  $D$ , начальным углом установки щупа -  $\alpha$ , величиной перекрытия зоны обработки -  $z$ , расстоянием от центра штамба до шарнира щупа -  $H$ , расстоянием между штамбами  $S$ , рабочей скоростью агрегата  $V_p$  и расстоянием установки щупа на первоначальный угол после его обхода вокруг штамба определили по программе на ПЭВМ Pentium 4:

- 1) размер щупа;
- 2) площадь обработанную дважды;
- 3) не обрабатываемую площадь около штамбовой зоны.

Задаваясь расстоянием ( $CC_4$  рисунок 2.15) установки щупа на первоначальный угол, после его обхода вокруг штамба, определили время возврата в исходное положение щупа, а по времени возврата подобрали пружину необходимой жесткости предварительно определив момент инерции рабочего органа.

## 11.9 Краткие выводы

- составлена математическая модель позволяющая определить площадь поверхности обработки с перекрытием около штамба и оставшейся не обработанной и размер щупа в зависимости: от диаметра штамба -  $D$ ; начального угла установки щупа -  $\alpha$ ; величины зоны перекрытия -  $z$ ; расстоянием от центра штамба до шарнира щупа -  $H$ ; расстоянием между штамбами -  $S$ ; рабочей скоростью агрегата -  $V_p$  и расстоянием установки щупа на первоначальный угол после его обхода вокруг штамба.

## 11.10 Результаты экспериментальных исследований

### 10.10.1 Исследование агрофона приствольных зон плодовых деревьев Исследования площади питания, размера и диаметра штамба.

В целях определения отклонения штамба культурных многолетних насаждений от геометрической оси ряда, характера распределения в рядах, а также отклонения размеров штамбов и его диаметров были проведены измерения в хозяйстве ОАО КСП «Светлогорское» ст. Светлогорская Абинский район Краснодарского края.

Сорт АЙДОРЕД. Подвой М9. Схема посадки 5 на 2 метра. Год посадки 1991.

Сорт ФЛОРИНА. Подвой ММ106. Схема посадки 7 на 5 метра. Год посадки 1990.

Сорт КУБАНСКАЯ БАГРЯНАЯ. Подвой СКС. Схема посадки 7 на 2,5 метра. Год посадки 1993.

Полигоны эмпирического распределения измерений показаны на рисунках 4.1...4.4. Кол – количество деревьев в данном интервале измерений.

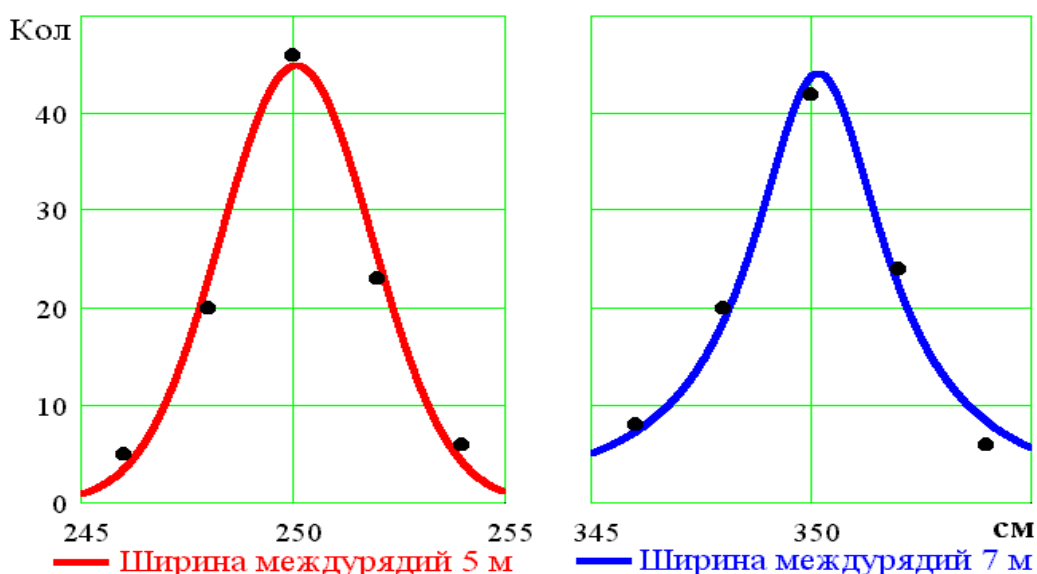


Рисунок 11.9 - Полигон эмпирического распределения отклонений деревьев от геометрической оси ряда.

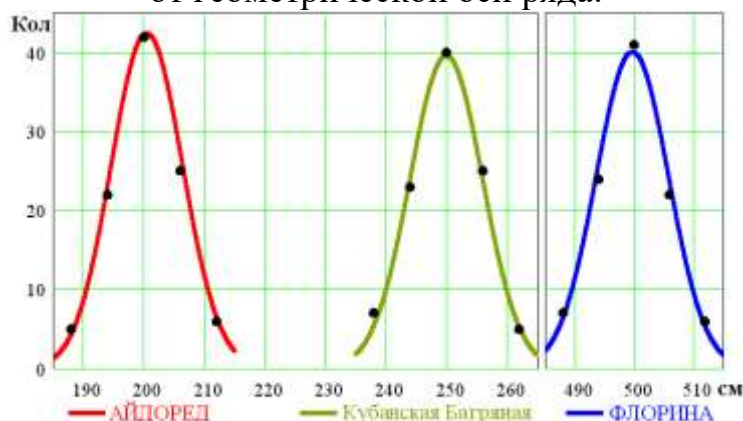


Рисунок 11.10 - Полигон эмпирического распределения расстояния между деревьями в ряду.

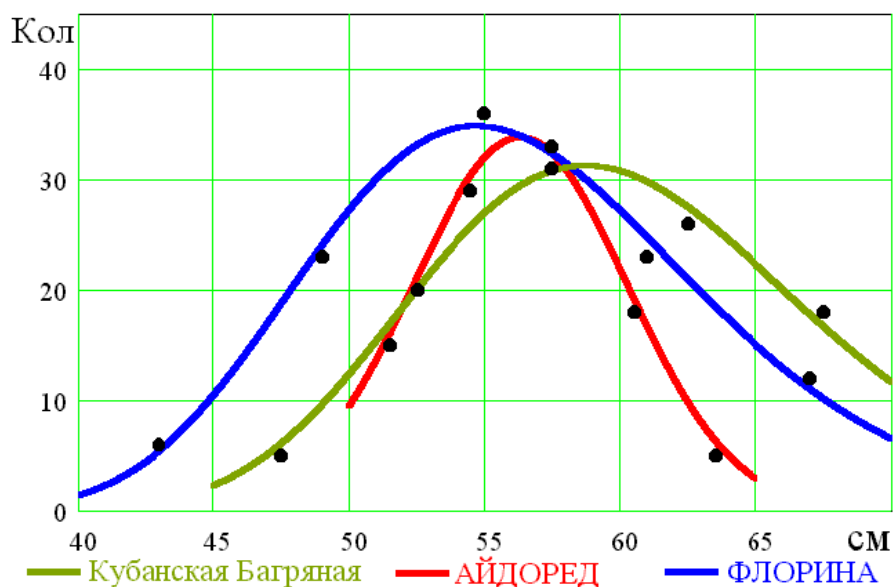


Рисунок 11.11 - Полигон эмпирического распределения, изменение размера штамба деревьев.

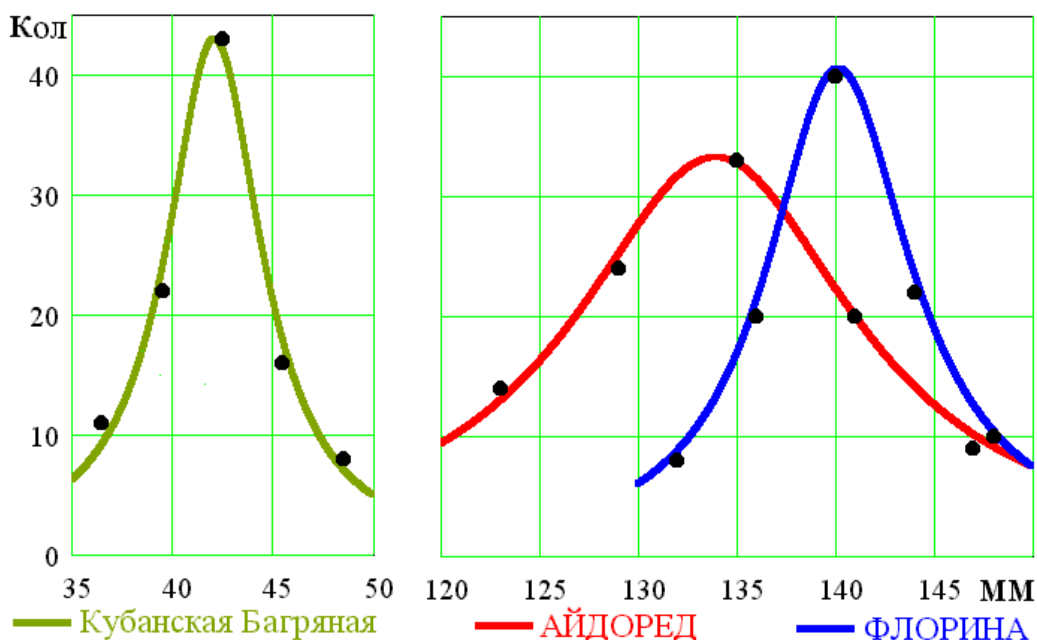


Рисунок 11.12 - Полигон эмпирического распределения, изменение диаметров штамба деревьев.

Установлено, что отклонения культурных многолетних насаждений от геометрической оси ряда, характера распределения в рядах, а также отклонения размера штамба и его диаметра, соответствуют закону нормального распределения.

Статистические характеристики распределения штамбов и его размеров приведены в таблице 11.2.

Несмотря на различные схемы наблюдается отличие полигонов эмпирического распределения. Это следует отнести за счет интенсивности

ремонта насаждений и сортовых особенностей, однако размеры площадей питания и размеры штамбов находятся в пределах исходных требований, средние значения которых находятся в пределах от 55,13 см до 58,69 см. Однако встречались размеры штамбов, которые равны и больше 41 см, их количество составляет 1,6 %. Это учитывалось при установке щупа по высоте, чтобы не повреждать нижнюю основную ветвь первого порядка ветвления.

Отклонения от геометрической оси ряда при междурядье 2,5 м -  $\pm 0,05$  м, а 3,5 м -  $\pm 0,07$  м, при этом коэффициент вариации составлял соответственно 0,836 и 0,600. Зона перекрытия при обработке по исходным требованиям  $0,20 \pm 0,1$  м, отклонения от геометрической оси ряда при прямолинейном движении агрегата не нарушают исходные требования.

Диаметр штамба изменялся от 41,63 до 139,81 мм (средние значения) в зависимости от срока посадки.

Максимальное отклонения в ряду деревьев  $\pm 0,15$  м.

#### 11.10.2 Оптимизация параметров пневматического щелевого распылителя с проточной камерой

Определение факторов влияющих на производительность и качество обработки.

При рассмотрении факторов влияющих на производительность и качество обработки учитывалось их расположение в пространстве относительно друг друга и их геометрические размеры.

Диаметр питательной трубки применяемых в эжикционно-щелевых распылителях колеблется от 3 до 5 мм [57, 58], приняли среднее значение 4 мм при площади выходного сечения  $12,57 \text{ мм}^2$ . Учитывая, что проходное сечение меньше, чем 1 мм применять не рекомендуется [57, 58] (забивание выходного отверстия), приняли минимальный размер щели питательной трубки 1 мм, при этом длина щели 12,57 мм при входном диаметре 4 мм.

При изготовлении необходимо установить питательное сопло как можно ближе к воздушному соплу, обеспечивая максимальную скорость воздушного потока с целью обеспечения максимальной дисперсии, одновременно учитывая расширение воздушного потока выходящего из плоского воздушного сопла.

При длине питательной щели 12,57 мм и расстоянии 8,5 мм (исходя из конструкции) минимальная ширина воздушного сопла составила 8 мм.

При ширине воздушного сопла 8 мм, минимальная высота воздушного сопла принята 0,15 мм, обеспечивающий расход воздуха при давлении 0,15 Мпа [59, 80], для диспергирования рабочей жидкости при выходном сечении питательного сопла 12,57 мм.

Размер проточной камеры и длина начального участка полуограниченной струи рассчитаны теоретически, срез питательной щели установили на одном уровне с полкой, образующий начальный участок

Таблица 1.2. - Статистические характеристики объекта исследований

Сорт	Среднее значение, $\bar{X}$	Стандартное отклонение, S	Ошибка выборочной средней, Sx	Коэффициент вариации, V	Относительная ошибка, %
А Й Д О Р Е Д	а) отклонения от геометрической оси ряда.				
	2,498	0,021	0,002	0,836	0,084
	б) отклонения в ряду				
	1,999	0,058	0,006	2,907	0,291
	в) размер штамба				
	55,130	3,202	0,320	5,705	0,571
	г) диаметр штамба				
134,300	6,629	0,663	4,936	0,494	
Ф Л О Р И Н А	а) отклонения от геометрической оси ряда.				
	3,495	0,021	0,002	0,600	0,060
	б) отклонения в ряду				
	4,994	0,061	0,060	1,211	0,121
	в) размер штамба				
	55,240	6,733	0,673	12,189	1,219
	г) диаметр штамба				
139,810	4,492	0,449	3,213	0,321	
КУБАНСКАЯ БАГРЯНАЯ	а) отклонения от геометрической оси ряда.				
	3,495	0,021	0,002	0,600	0,060
	б) отклонения в ряду				
	2,495	0,061	0,061	2,461	0,246
	в) размер штамба				
	58,690	6,001	0,600	10,225	1,023
	г) диаметр штамба				
41,630	3,308	0,331	7,946	0,795	

полуограниченной струи для создания максимального скоростного напора.

Другие конструктивные параметры нашего распылителя использовать в качестве управляемых факторов мы считаем нецелесообразно, так как они не являются определяющими для качественной работы нашего распылителя.

Анализ непрерывных симметричных планов второго порядка показал, что максимальное значение определителя информационной матрицы достигается в том случае, когда моменты плана соответственно равны [8].

Для этого использовали симметричный композиционный план типа В<sub>к</sub> (звездные точки которого равны  $\pm 1$ ). Изучалось влияние трех факторов и

фиксированы их значения на оптимальных уровнях. Факторы, интервалы и уровни варьирования представлены в таблице 11.3

Таблица 11.3. - Факторы, интервалы и уровни варьирования

Факторы	Кодированное обозначение	Интервал варьирования	Уровни факторов		
			-1	0	+1
Ширина воздушного сопла (H), мм	$x_1$	1	8	9	10
Высота воздушного сопла (h), мм	$x_2$	0,15	0,15	0,3	0,45
Размер щели питательной трубки (S), мм	$x_3$	1	1	2	3

Таблица 4.3 – Матрица планирования при оптимизации качественных показателей работы распылителя

№ опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$	Производительность У, гр./мин
1	+1	10	0,45	4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	247,9
2	+1	8	0,45	4	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	197,4
3	+1	10	0,15	4	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	111,9
4	+1	8	0,15	4	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	89,5
5	+1	10	0,45	2	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	222,2
6	+1	8	0,45	2	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	185,2
7	+1	10	0,15	2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	98,1
8	+1	8	0,15	2	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	83,8
9	+1	10	0,30	3	+1	0	0	0	0	0	+1	0	0	162,2
10	+1	8	0,30	3	-1	0	0	0	0	0	+1	0	0	114,1
11	+1	9	0,45	3	0	+1	0	0	0	0	0	+1	0	186,3
12	+1	9	0,15	3	0	-1	0	0	0	0	0	+1	0	101,0
13	+1	9	0,30	4	0	0	+1	0	0	0	0	0	+1	212,8
14	+1	9	0,35	2	0	0	-1	0	0	0	0	0	+1	192,3
15	+1	9	0,30	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150,8
16	+1	9	0,30	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	164,8
17	+1	9	0,30	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	161,3
18	+1	9	0,30	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	154,6
19	+1	9	0,30	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	157,1
20	+1	9	0,30	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	159,6

На качество опрыскивания влияет количество подаваемой рабочей жидкости (минутный расход  $q$ ), медианно-массовый диаметр капель (ММД) и плотность покрытия каплями обрабатываемой поверхности или количество капель на  $1 \text{ см}^2$  [85].

Уровни факторов выбирали таким образом, чтобы оптимальные их значения, рассчитанные теоретически или учитывающие существующие ограничения, попадали в центр интервала варьирования.

Максимальным значением для первого фактора  $x_1$  являлся размер ширины воздушного сопла равный  $H_{\max} = 10$  мм и снижался до  $H_{\min} = 8$  мм, что соответствовало интервалу варьирования.

Для второго фактора  $x_2$  значения, являлся размер высоты воздушного сопла равный  $h_{\max} = 0,45$  мм и снижался до  $h_{\min} = 0,15$  мм, что соответствовало интервалу варьирования.

Максимальным и минимальным значением для третьего фактора  $x_3$  было принято размер щели питательной трубки  $S$ , от 1 мм до 3 мм, при постоянном выходном сечении эквивалентному диаметру 4 мм ( $12,57 \text{ мм}^2$ ).

Положению уравнительной емкости выбрано постоянным, когда уровень рабочей жидкости в ней совпадал с выходным отверстием питающей трубки. Это не позволяло жидкости истекать из емкости при отключении подачи воздуха.

Значения первого и второго фактора устанавливали и фиксировали в корпусе распылителя, третий фактор фиксировался установкой питательных трубок в соответствующем отверстии в корпусе распылителя.

На основании этих рассуждений были выбраны интервалы варьирования и уровни факторов, значения которых занесены в таблицу 11.3. Матрица планирования представлена в таблице 11.4. Опыты проводили согласно описанной выше методике. Порядок проведения опытов выполнялся согласно таблице случайных чисел. Средние величины параметров оптимизации представлены в таблице 11.2. Результаты экспериментальных исследований по определению основных качественных показателей и оптимизации параметров пневматического щелевого распылителя с проточной камерой обработали по известным методикам [75, 76, 8].

Анализ производительности пневматического щелевого распылителя с проточной камерой.

После математической обработки экспериментальных данных получили следующие уравнения регрессии для производительности распылителя:

$$Y = 164,91 + 17,232 \cdot x_1 + 55,47 \cdot x_2 + 7,801 \cdot x_3 + 6,372 \cdot x_1 \cdot x_2 - 26,561 \cdot x_1^2 - 21,003 \cdot x_2^2 + 37,861 \cdot x_3^2, \quad (11.34)$$

где  $Y$  - производительность распылителя, мл/мин.



Продифференцировав уравнение по каждой из переменных и приравняв производные нулю, получили систему линейных уравнений.

Решая систему линейных уравнений находим координаты центра поверхности отклика :

$$\begin{aligned}x_1 &= 0,492 \\x_2 &= 1,395 \\x_3 &= -0,103\end{aligned}$$

Подставив в исходное уравнение (11.11) значения  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  находили значения параметра оптимизации в центре поверхности отклика.

При этом получили  $Y_s = 207,4$  мл/мин.

Где  $Y_s$ - значение отклика в новом начале координат (свободный член канонического уравнения).

Определили угол поворота осей координат поверхности отклика (старых осей) до совмещения с главными осями фигуры :

Угол  $\alpha$  равен  $0^\circ$ .

Уравнение регрессии в канонической форме будет иметь вид

$$Y - 207,4 = -26,561 \cdot X_1^2 - 21,003 \cdot X_2^2 + 37,86 \cdot X_3^2, \quad (11.35)$$

или:

$$\frac{(X_1)^2}{\frac{Y - 207,4}{-26,561}} + \frac{(X_2)^2}{\frac{Y - 207,4}{-21,003}} + \frac{(X_3)^2}{\frac{Y - 207,4}{37,86}} = 1, \quad (11.36)$$

Поверхность отклика представляет гиперболу, а ее центр - минимакс, поскольку коэффициенты имеют разные знаки [8, 41].

Для более детального представления о поверхности отклика поверхность отклика изучали с помощью двумерных сечений.

Рассмотрим сечение плоскостью  $X_1SX_2$ .

Для этого в исходное уравнение (4.1) подставим  $x_3 = -0,103$ . Тогда

$$\begin{aligned}Y_{12} &= 164,51 + 17,232 \cdot x_1 + 55,47x_2 + 6,372 \cdot x_1 \cdot x_2 - \\ &- 26,561 \cdot x_1^2 - 21,003 \cdot x_2^2\end{aligned}, \quad (11.37)$$

где  $Y_{12}$  - производительность распылителя при взаимодействии 1 и 2 фактора, 3-й фактор в центре плана.

Выполняя каноническое преобразование и решая систему линейных уравнений, находим координаты центра поверхности отклика

$$x_1 = 0,492, \quad x_2 = 1,395$$

Подставляя найденные значения  $x_1, x_2$  в уравнение (11.37) определяем значение параметра оптимизации в центре поверхности отклика, когда  $x_3=0,103$ .

$$Y_{S_{12}} = 207,4$$

Угол поворота осей  $\alpha$  равен  $-24,45$  градусов, а коэффициенты регрессии в канонической форме равны:  $B_{11} = -28,009$ ;  $B_{22} = -19,555$  (см. приложение 4).

Уравнение регрессии в канонической форме [62, 70]

$$Y_{12} - 207,4 = -28,009 \cdot X_1^2 - 19,555 \cdot X_2^2, \quad (11.38)$$

Поверхность отклика представляет собой эллипсоид (рисунок 11.15), а ее центр - экстремум, причем максимум, так как канонические коэффициенты отрицательны в каноническом уравнении (11.15).

Далее рассмотрим сечение поверхности отклика  $X_1SX_3$ . Для этого в исходное уравнение (11.11) подставим  $x_2 = 1,395$ . Уравнение принимает вид:

$$Y_{13} = 201,42 + 26,121 \cdot x_1 + 7,801 \cdot x_3 - 26,561 \cdot x_1^2 + 37,861 \cdot x_3^2, \quad (11.39)$$

Выполнив канонические преобразования и решая систему линейных уравнений, находим координаты центра поверхности отклика:

$$x_1 = 0,492, \quad x_3 = -0,103.$$

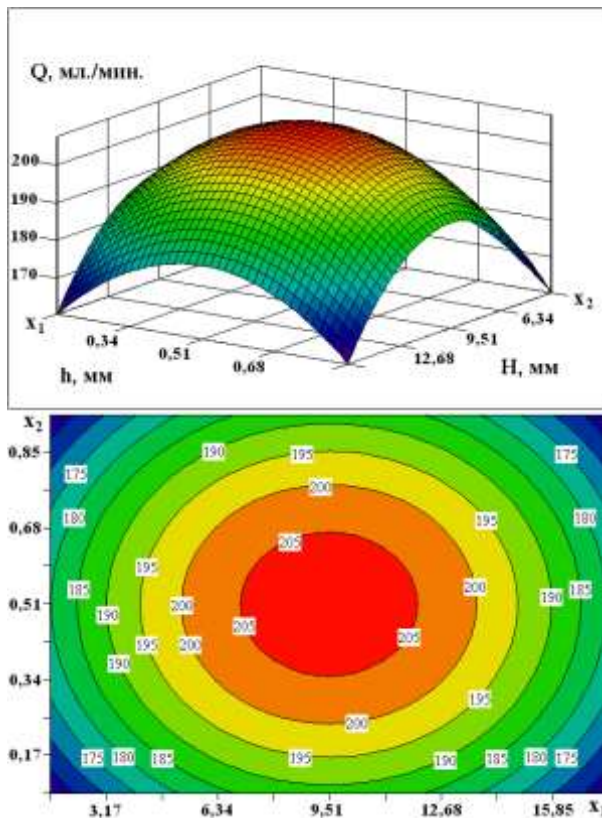


Рисунок 11.13 - Поверхность зависимости производительности от ширины воздушного сопла и его высоты и его двумерное сечение

Подставляя найденное значение  $x_1$  и  $x_3$  в уравнение (11.16), определяем значение параметра оптимизации в центре поверхности отклика, когда  $x_2 = 1,395$ .

$$Y_{13} = 207,4.$$

Угол поворота осей  $\alpha$  равен нулю градусов, так как уравнение (11.40) не имеет парных взаимодействий, а коэффициент регрессии в канонической форме равен:  $B_{11} = -26,561$ ,  $B_{33} = 37,861$  (см. приложение 4).

Уравнение регрессии в канонической форме

$$Y_{13} - 207,4 = -26,561 \cdot X_1^2 + 37,861 \cdot X_3^2, \quad (11.41)$$

Поверхность отклика - гиперболоид, а ее центр - минимакс, поскольку коэффициенты имеют разные знаки, которая представлена на рисунке 11.14. Гиперболы вытянуты по той оси, которой соответствует меньшее по абсолютной величине значение коэффициента в каноническом уравнении (11.17).

Рассмотрим сечение поверхности отклика  $X_2SX_3$ . Для этого в исходное уравнение (11.11) подставим  $x_1 = 0,492$ , тогда уравнение примет вид:

$$Y_{23} = 166,96 + 58,61 \cdot x_2 + 7,801 \cdot x_3 - 21,003 \cdot x_2^2 + 37,861 \cdot x_3^2. \quad (11.42)$$

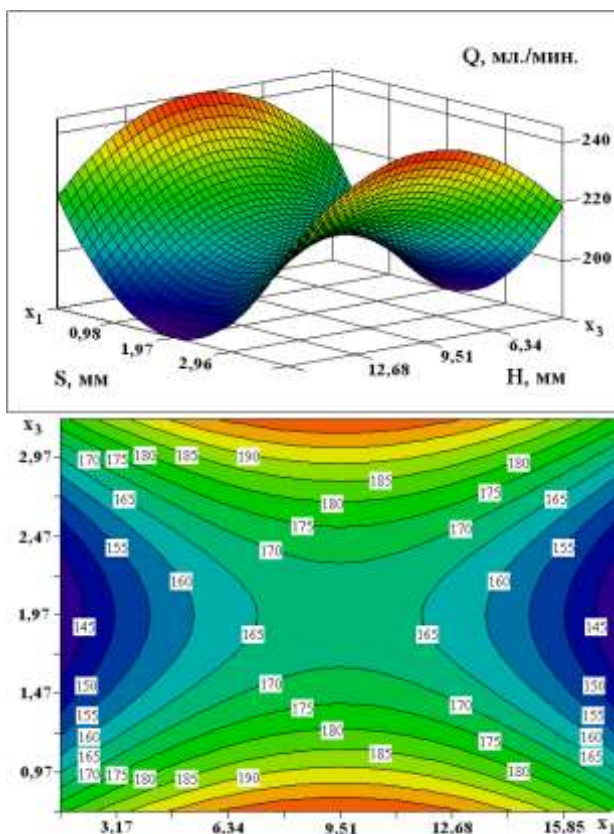


Рисунок 11.14 - Поверхность зависимости производительности от ширины воздушного сопла и размера щели питательной трубкой и его двумерное сечение

Выполнив канонические преобразования и решая систему линейных уравнений, находим координаты центра поверхности отклика:

$$x_2 = 1.395, \quad x_3 = -0,103.$$

Подставляя найденные значения в уравнение (11.42), определяем значение параметра оптимизации в центре поверхности отклика, когда  $x_1 = 0,492$ .

$$Y_{S_{23}} = 207,4.$$

В виду того, что в уравнении (11.18) не имеет парное взаимодействие  $(x_2x_3)$ , угол поворота осей  $\alpha$  равен нулю градусов.

Тогда коэффициент в канонической форме будет следующий:

$$B_2 = -21,003, \quad B_3 = 37,861 \text{ (см. приложение 4).}$$

Уравнение регрессии в канонической форме примет вид:

$$Y_{23} - 207,4 = -21,003 \cdot X_2^2 + 37,861 \cdot X_3^2, \quad (11.43)$$

Поверхность отклика - гиперболоид, а ее центр минимакс (рисунок 11.17), поскольку коэффициенты имеют разные знаки. Гиперболы вытянуты по той оси, которой соответствует меньшее по абсолютной величине значение коэффициента в каноническом уравнении (11.43).

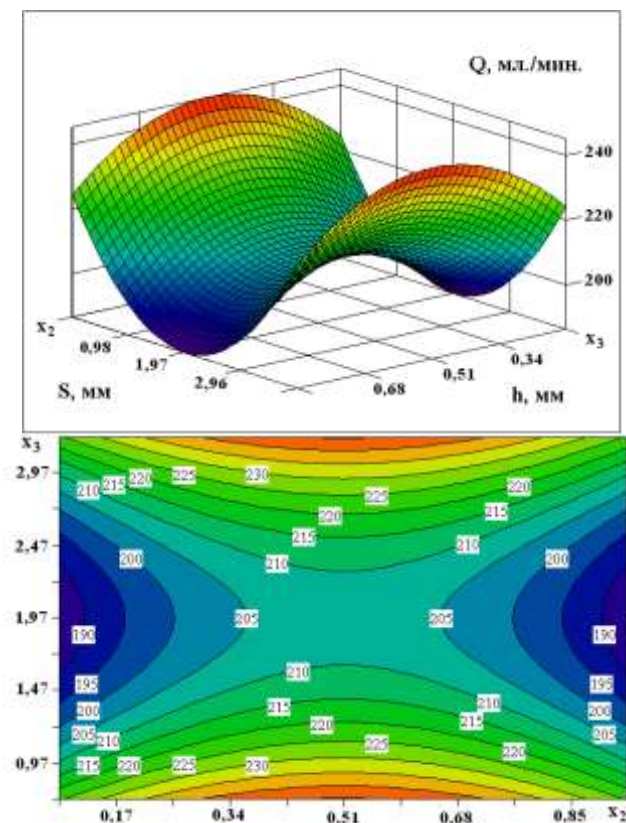


Рисунок 11.15 - Поверхность зависимости производительности от высоты воздушного сопла и размера щели питательной трубкой и его двумерное сечение

Подставим различные значения отклика  $Y$  в канонические уравнения (11.15) было получено семейство сопряженных изолиний (рисунок 11.13), когда  $x_3 = -0,103$  т.е. значение размера щели питательной трубки находится в центре плана. Расположение элементов производительности в области эксперимента напоминало поверхность типа «эллипса». Центр эксперимента лежит за пределами области эксперимента это касается высоты воздушного сопла. Максимальная производительность в данном случае будет при высоте воздушного сопла 0,51 мм и ширины воздушного сопла 9,51 мм.

Рассмотрим аналогично двумерное сечение плоскостью  $X_1SX_3$  (рисунок 11.14), когда  $x_2 = 1,395$  т.е. значение высоты воздушного сопла находится в центре плана. Расположение элементов производительности в области эксперимента напоминало поверхность типа «Сходящихся гребней». Из рисунка 11.14 можно сделать вывод, что изменение значения  $x_1$  в пределах эксперимента влияет на производительность по закону параболы, т.е. с увеличением ширины воздушного сопла выше центра плана производительность падает, а при увеличении значения размера щели питательной трубки ( $x_3$ ) производительность возрастает (больше расход жидкости).

Рассмотрев двумерное сечение плоскостью  $X_1SX_3$  и значения таблицы, определяем, что оптимальный размера щели питательной трубки ( $x_3$ ) равен 1,97 мм.

Рассмотрим аналогично двумерное сечение  $X_2SX_3$  (рисунок 11.15), когда  $x_1=0,492$  т.е. значение диаметра питательной трубки находится в центре плана. Расположение элементов производительности в области эксперимента напоминало поверхность типа «Сходящихся гребней». Из рисунка 11.15 видно, что изменение значения ( $x_2$ ) в пределах эксперимента влияет на производительность также по закону параболы, т.е. с увеличением высоты воздушного сопла относительно центра плана производительность падает, а при увеличении значения размера щели питательной трубки ( $x_3$ ) производительность возрастает (больше расход жидкости).

### 11.10.3 Распределение фракционного состава рабочей жидкости

Одним из важнейших факторов при оценке качества опрыскивания является размер капель. Установлено, что при химической обработке растений на объекте удерживаются капли размером 80...360 мкм [64, 68].

Наряду с этим определяющим фактором при оценке качества опрыскивания является плотность покрытия, т.е. количество капель на  $1 \text{ см}^2$ , а также степень покрытия выраженная в % (отношение площади покрытой жидкостью к общей). Распределение фракционного состава рабочей жидкости изучалось с использованием лабораторной полевой установки, использовали воду, окрашенную красителем (При исследовании физико-механических свойств рабочей жидкости ее свойства схожи со свойствами

воды, связано с тем, что очень малая концентрация гербицида «Зеро» - 3,6%, при внесении гербицида 3 литра на один гектар и расходе рабочей жидкости 30 литров на гектар).

Лабораторно-полевые испытания проводили в боксе факультета механизации КубГАУ, а производственные испытания проводили при обработке яблоневого сада (средний диаметр штамбов 134 мм и расстояние между ними 2 м) в хозяйстве ОАО КСП «Светлогорское» с. Светлогорское Абинского района Краснодарского края.

В качестве коллекторов применяли мелованную бумагу, при этом коэффициент распыления приняли  $K=1,21$ . Коллекторы были в виде прямоугольных лент, состоящих из листов размером 210x297 мм. Они были разложены по всей ширине захвата распылителя на заданном режиме работы, затем они разрезались на коллекторы 30x40 мм и обрабатывались.

Для анализа исследовались 1830 капель, размеры которых распределялись на 7 классов с интервалом в 50 мкм.

С помощью микроскопа МПБ-2 на коллекторах фиксировали следы капель размером от 50 до 400 мкм.

Данные микроскопирования и расчетов занесли в таблицу, на основании которой построили графики распределения фракционного состава распыленной жидкости (рисунок 11.16) и доверительную вероятность распределения фракционного состава рабочей жидкости (рисунок 11.17).

После обработки результатов микроскопирования были определены необходимые показатели качества обработки объекта:

средний диаметр капли	- 186 мкм;
медианно-массовый диаметр	- 206 мкм;
плотность покрытия	- 122 кап./см <sup>2</sup> ;
производительность распылителя	- 0,207 л/мин.

Анализируя доверительную вероятность распределения фракционного состава (рисунок 11.17), можно сказать, что основная масса жидкости содержится в каплях с диаметрами от 140 до 230 мкм, что является наилучшим интервалом варьирования размера капель при работе с гербицидами. Это подтверждается также исследованиями В.Ф. Дунского, А.В. Богданова.

При рассмотрении кривой распределения видно, что диаметр капель варьирует от 50 до 400 мкм. Медианно-массовый диаметр составил 206,1 мкм, что говорит о достаточном качестве распыла, так как при обработке гербицидами в целях предупреждения сноса капель и удержания их на растениях рекомендуется диаметр от 80 до 360 мкм, в нашем случае средний диаметр капли составил 186,33 мкм. Наличие капель, диаметр которых превышал 360 мкм, составляет не более 2,63 %.

Степень использования весового количества рабочей жидкости составила 82 % и является достаточно высокой.

#### 11.10.4 Исследование скоростной характеристики воздушной струи щелевого сопла распылителя

Зависимость скорости воздушной струи распылителя.

Поскольку скорость воздушной струи распылителя и ее массовый расход обеспечивают определенную производительность распылителя, необходимо знать указанные параметры струи, рабочие параметры которого

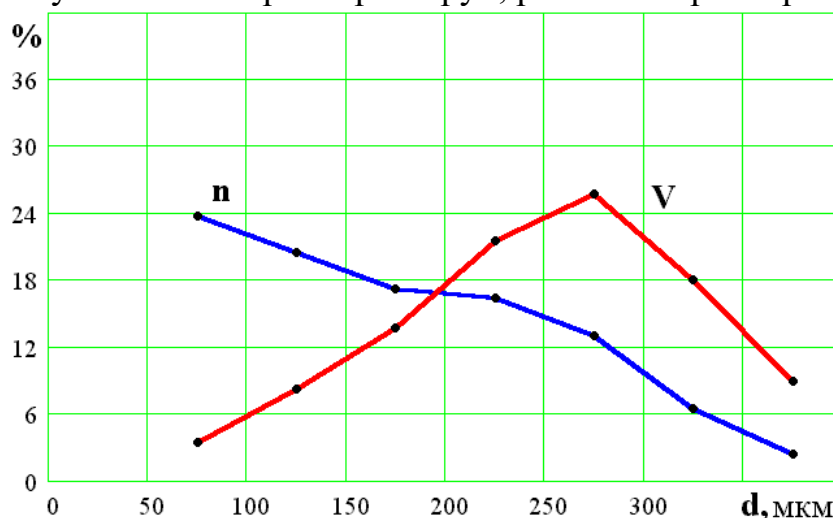


Рисунок 11.16 - Распределение фракционного состава рабочей жидкости:

$n$  - удельное содержание; %;  $V$  - удельный объем, %.

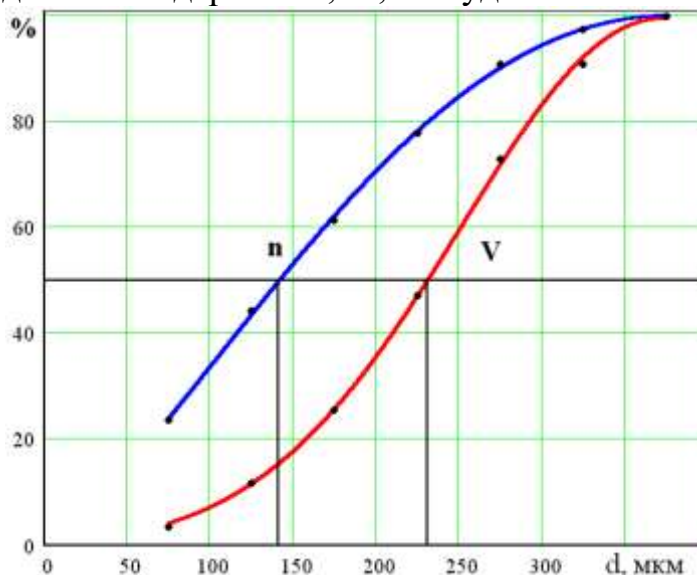


Рисунок 11.17 - Доверительная вероятность распределения фракционного состава рабочей жидкости: [69, 78, 83]

$n$  - удельное содержание; %;  $V$  - удельный объем, %.

Таким образом, качественные показатели процесса опрыскивания предлагаемым устройством находится в пределах исходных требований могут быть определены экспериментальным путем. Расстояние от



распылителя было выбрано от 0,1 до 1,0 метра по конструктивным и исходным требованиям. Давление воздуха принято - основное давление  $\pm 0,2$  Мпа.

Для исследования осевой скорости воздушной струи, создаваемой распылителем, была использована экспериментальная установка (рисунок 11.4) с распылителем рабочей жидкости таблица 11.6.

Таблица 11.5 - Характеристика исследуемого распылителя

Давление воздуха P, МПа	Ширина выходного отверстия сопла H, мм	Толщина выходного отверстия сопла h, мм	Расстояние от распылителя L, м
0,13; 0,15; 0,17	9,51	0,51	0,1; 0,25; 0,5; 0,75, 1,0

Замеры осевой скорости воздушной струи проводились на расстояниях L, приведенных в таблице 11.6, с использованием ручного анемометра (АРИ-49).

Результаты скорости воздушной струи распылителя приведены на рисунке (11.18). На графике изображены экспериментальные кривые для распылителя при разных давлениях [60].

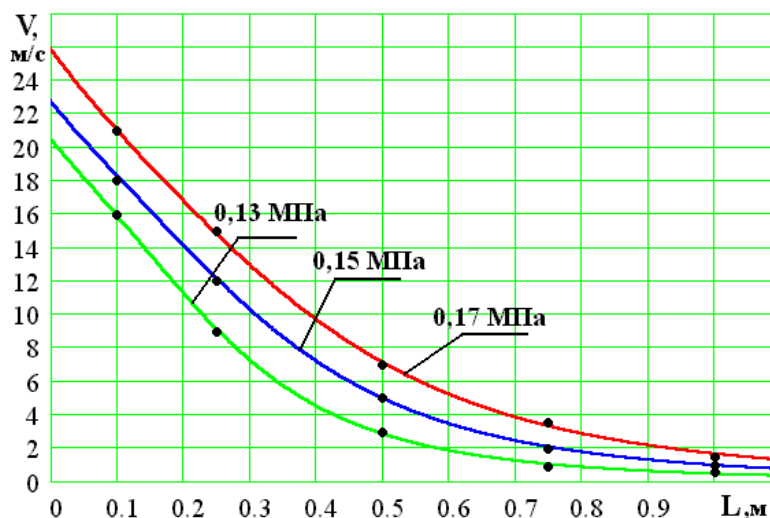


Рисунок 11.18 - График зависимости скорости воздушной струи от расстояния до сопла при разных давлениях

Анализируя изменения скорости воздуха, можно отметить, что скорость воздушной струи составляет не менее 20 м/с на выходе из распылителя и снижалось до 1 м/с на расстоянии 1 м, а при  $L = 0,75$  м, и рабочем давлении 0,15 Мпа составляет 2 м/с, что вполне достаточно для обработки приствольных зон гербицидами.

11.10.5 Зависимость степени покрытия обрабатываемого объекта от расстояния до распылителя



Для анализа использовались коллекторы расположенные по ширине захвата. Исходные четыре коллектора общей длиной 1,2 м после обработки, разрезались на 10 частей поперек, затем подготавливались данные с помощью сканера. Используя Matcad 2000 по программе «Степень покрытия поверхности» [86], определяли степени покрытия обрабатываемого объекта от расстояния до распылителя.

Методика определения степени покрытия поверхности с помощью ЭВМ описана в 3 главе.

Результаты покрытия обрабатываемого объекта от расстояния приведены на рисунке (11.19). На графике изображены: точки полученные экспериментально и аппроксимированная функция (11.20), выражающая зависимость степени покрытия обрабатываемого объекта от расстояния до распылителя [67].

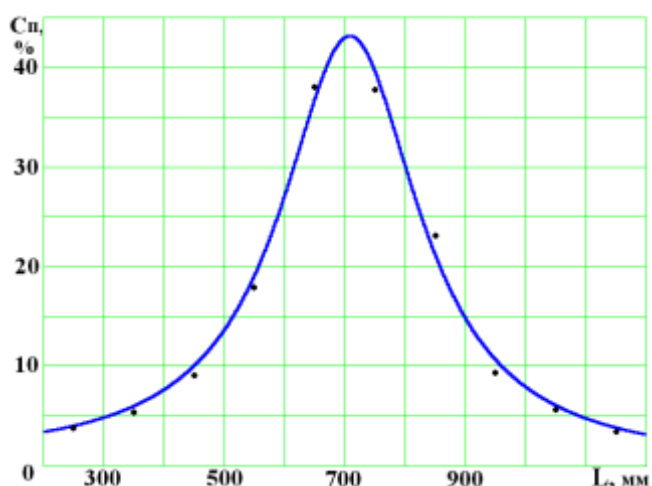


Рисунок 11.19 - Зависимость степени покрытия (Sp) обрабатываемого объекта от расстояния до распылителя

$$\tilde{N}_i = e^{(a \cdot L^2 + b \cdot L + c)}, \quad (11.44)$$

где  $a = -27,993 \cdot 10^{-6}$ ;  $b = 39,556 \cdot 10^{-3}$ ;  $c = -10,266$ .

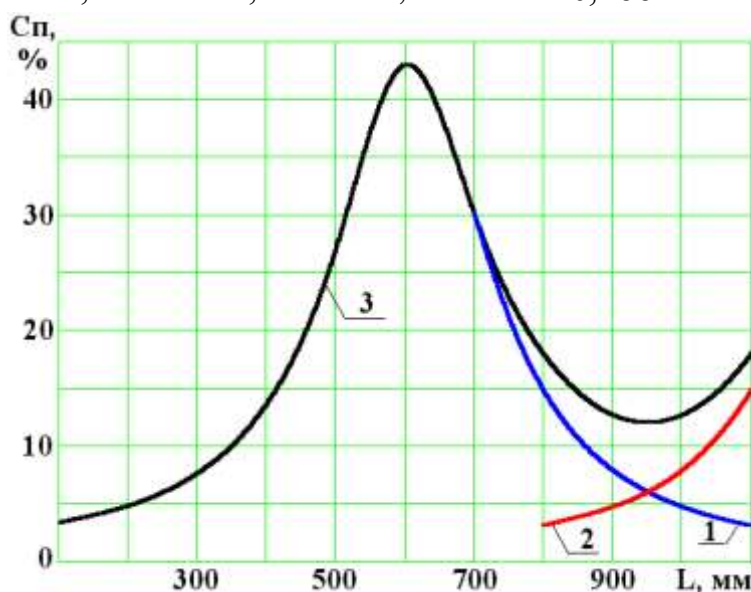


Рисунок 11.20- Зависимость степени покрытия обрабатываемого объекта от расстояния до распылителя при прямом и обратном проходе:

- 1- степень покрытия при прямом проходе;
- 2- степень покрытия при обратном проходе учитывающая зону перекрытия (центр штамба на расстоянии 1050 мм);
- 3- суммарная степень покрытия в приштамбовой зоне.

Зависимость степени покрытия обрабатываемого объекта от расстояния до распылителя подчиняется нормальному закону распределения. Дальность при которой коэффициенте вариации равен 32% равна 0,6 м, что удовлетворяет условиям исходных требований (рисунки 11.19 и 11.20). Из этого следует, что при обработке приштамбовой зоны на рабочий орган следует устанавливать один распылитель при длине щупа 0,75 м, который по нашим лабораторным исследованиям и полевым опытам удовлетворяет условиям исходных требований.

### 11.11 Оптимизация конструктивных параметров поворотного устройства

Оптимизация параметров рабочего органа опрыскивателя влияющих на качественные показатели, являются количественными факторами, и задача сводится к выбору их оптимальных величин. Для этого использовали симметричный композиционный план типа  $B_k$  [81] Изучалось влияние трех факторов и фиксированных их значения на оптимальных уровнях. Факторы, интервалы и уровни варьирования представлены в таблице 11.6

Уровни факторов выбирали таким образом, чтобы оптимальные их значения, рассчитанные теоретически или учитывающие существующие ограничения, попадали в центр интервала варьирования.

Максимальным значением для первого фактора  $x_1$  являлся угол установки рабочего органа относительно штамба равный  $\alpha_{\max} = 70^{\circ}$  и снижался до  $\alpha_{\min} = 50^{\circ}$ , что соответствовало интервалу варьирования.

Для второго фактора  $x_2$  значения, являлось расстояние между штамбами равной  $S_{\max} = 4000$  мм и снижался до  $S_{\min} = 2000$  мм, что соответствовало интервалу варьирования.

Максимальным и минимальным значением для третьего фактора  $x_3$  было принято размер диаметра штамба  $D$ , от 40 мм до 300 мм, при этом весь интервал размеров был разбит на два – 40...100 и 100...300 (таблица 11.6).

В качестве отклика приняты площадь обработанная дважды и не обработанная около штамба в двух интервалах размеров штамбов.

Использовать другие конструктивные параметры опрыскивателя в качестве управляемых факторов мы считаем нецелесообразно, так как они не являются определяющими для качественной работы опрыскивателя.

На основании этих рассуждений были выбраны интервалы варьирования и уровни факторов, значения которых занесены в таблицу 4.5. Матрицы планирования аналогичны. Расчет проводили согласно описанной

Таблица 11.6- Факторы, интервалы и уровни варьирования

Факторы	Кодированное обозначение	Интервал варьирования	Уровни факторов		
			-1	0	+1
Угол установки рабочего органа ( $\alpha$ ), град.	$x_1$	10	50	60	70
Расстояние между штамбами (S), мм	$x_2$	1000	2000	3000	4000
а) диаметр штамба (D), мм	$x_3$	20	40	60	100
б) диаметр штамба (D), мм	$x_3$	100	100	200	300

выше методике. Средние величины параметров оптимизации представлены в таблице 11.6. Результаты обработки математической модели рабочего органа опрыскивателя по определению основных качественных показателей и оптимизации параметров рабочего органа опрыскивателя обработали по известным методикам.

#### Анализ параметров поворотного устройства.

После обработки результатов эксперимента (математической модели поворотного устройства) получили следующие уравнения регрессии площади при двукратной обработке приштамбовой зоны в двух интервалах значений диаметра штамба:

$$Y_{o,40-100} = 6,22 + 5,01 \cdot 10^{-3} x_1 + 0,09 \cdot x_2 - 0,43 \cdot x_3 + 0,025 \cdot x_1 \cdot x_3 + 8,23 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,039 \cdot x_1^2 - 0,027 \cdot x_2^2 + 0,02 \cdot x_3^2, \quad (11.45)$$

$$Y_{o,100-300} = 4,85 + 0,03 \cdot x_1 + 0,08 \cdot x_2 - 0,82 \cdot x_3 - 0,023 \cdot x_2 \cdot x_3 - 9,25 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_2 - 5 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,083 \cdot x_1^2 - 0,017 \cdot x_2^2 + 0,11 \cdot x_3^2, \quad (11.22)$$

где  $Y_o$  - площадь при двукратной обработке приштамбовой зоны, мм<sup>2</sup>.

Уравнения регрессии не обработанной площади приштамбовой зоны в двух интервалах значений диаметра штамба:

$$Y_{n,40-100} = 0,015 - 4,55 \cdot 10^{-3} x_1 - 5,33 \cdot 10^{-3} \cdot x_2 + 0,018 \cdot x_3 - 7,09 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 \cdot x_3 - 7,01 \cdot 10^{-3} \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (11.46)$$

$$Y_{n,100-300} = 0,13 - 0,05 \cdot x_1 - 0,04 \cdot x_2 + 0,13 \cdot x_3 - 0,029 \cdot x_2 \cdot x_3 + \\ + 0,024 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,036 \cdot x_1 \cdot x_3 + 9,58 \cdot 10^{-3} \cdot x_1^2 + 0,013 \cdot x_2^2 + 0,032 \cdot x_3^2 \\ ,(11.24)$$

где  $Y_n$  - не обработанная площадь приштамбовой зоны, мм<sup>2</sup>.

Выполняя каноническое преобразование, принимая  $x_2=0$  получили следующие выражения:

1) не обработанные площади приштамбовой зоны в двух интервалах значений диаметра штамба

$$\frac{X_1^2}{Y_{n,40-100} - 0,0028} + \frac{X_3^2}{Y_{n,40-100} - 0,0028} = 1, \quad (11.47)$$

$$\frac{0,0035}{-0,0035}$$

$$\frac{X_1^2}{Y_{n,100-300} - 0,399} + \frac{X_3^2}{Y_{n,100-300} - 0,399} = 1, \quad (11.48)$$

$$\frac{-4,637 \cdot 10^{-4}}{0,0416}$$

2) площади при двукратной обработке приштамбовой зоны в двух интервалах значений диаметра штамба

$$\frac{X_1^2}{Y_{o,40-100} - 3,398} + \frac{X_3^2}{Y_{o,40-100} - 3,398} = 1, \quad (11.49)$$

$$\frac{0,0452}{0,0144}$$

$$\frac{X_1^2}{Y_{o,100-300} - 3,34} + \frac{X_3^2}{Y_{o,100-300} - 3,34} = 1, \quad (11.50)$$

$$\frac{0,0827}{0,11}$$

Для более детального исследования поверхности откликов изучали с помощью двумерных сечений, строим данные сечения по уравнениям (11,25...11,28).

Анализируя зависимость поверхности необработанной площади приштамбовой зоны (рисунок 11.21) от угла установки рабочего органа и диаметра штамба, изменение которого рассматривалось в пределах 40...100 мм и в пределах 100...300 мм можно отметить, что изменение угла установки рабочего органа не завит от диаметра штамба при увеличении его начиная со 100 мм и напротив при уменьшение размера штамба увеличивается зависимость от угла установки рабочего органа, но на сам технологический процесс мало влияет так, как поверхность зависимости не обработанной площади приштамбовой зоны лежит в пределах 0...0,003% при установке угла рабочего органа на 60 градусов. Анализируя зависимость поверхности площади при двукратной обработке приштамбовой зоны (рисунок 11.22) от угла установки рабочего органа и диаметра штамба, изменение которого в пределах 40...100 мм и в пределах 100...300 мм можно отметить, что изменение угла установки

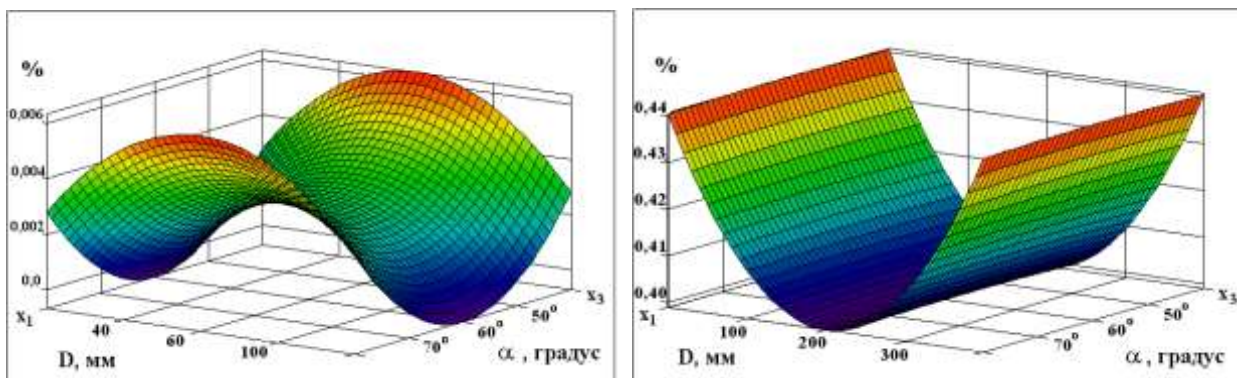


Рисунок 11.21 - Зависимость не обработанной площади приштамбовой зоны от угла установки рабочего органа и диаметра штамба, изменение которого в пределах 40...100 мм (слева) и 100...300 мм (справа)

рабочего органа зависит от диаметра штамба при увеличении его начиная со 100 мм в большей степени по сравнению диаметром штамба меньшего размера, как видно в обоих случаях, что оптимальное значение будет при установке угла рабочего органа на 60 градусов.

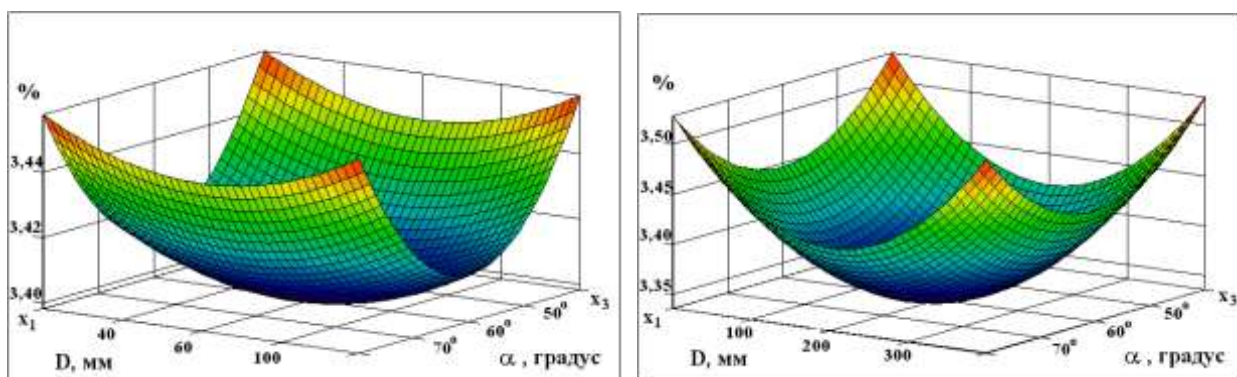


Рисунок 11.22 - Зависимость площади при двукратной обработке приштамбовой зоны от угла установки рабочего органа и диаметра штамба, изменение которого в пределах 40...100 мм (слева) и 100...300 мм (справа)

Применение формулы Нукияма-Таназава для определения дисперсности распыла при опрыскивании пневматическими щелевыми распылителями.

Для воздушно-струйных распылителей пока не существует теоретических методов расчета. Для расчета пользуются эмпирическими формулами определения качественных показателей работы.

Из графика на рисунке 11.23 следует, что оптимальный угол при работе в приствольных зонах следует принимать 58...60 градусов.

Для небольших воздушно-струйных распылителей известна формула, предложенная Нукияма-Таназава, полученная на основе результатов несколько сот опытов: [63]

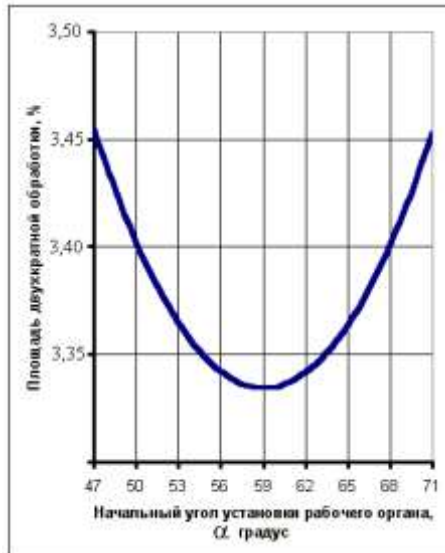


Рисунок 11.23 - Зависимость площади двукратной обработки от начального угла установки рабочего органа (диаметр штамба 200 мм)

$$d_s = \frac{585}{w - v} \cdot \left(\frac{\delta}{\rho}\right)^{0,5} + 597 \cdot \left(\frac{\eta}{\sqrt{\delta \cdot \rho}}\right)^{0,45} \cdot (1000 \cdot \frac{Q_w}{Q_v}), \quad (11.51)$$

где  $d_s$  – средний объемно-поверхностный диаметр капель (средний диаметр по Заутеру), мкм;

$w$  и  $v$  – скорости воздуха и жидкости, м/с;

$\delta$  – поверхностное натяжение жидкости, г/см;

$\eta$  – вязкость жидкости, пуаз;

$\rho$  – плотность жидкости, г/см<sup>3</sup>;

$Q_w/Q_v$  – отношение объемных расходов жидкости и воздуха.

Формула (11.29) получена для распылителей различной конструкции и применима в диапазоне  $\delta = (50...110) \cdot 10^{-3}$  г/см,  $\rho = 0,6...1,5$  г/см<sup>3</sup> и  $\eta = (0,5...1,5) \cdot 10^5$  пуаз при до звуковых значениях скорости воздуха.

Согласно формуле (11.29), при малых относительных расходах жидкости  $Q_w/Q_v$  средний диаметр капель  $d_s$  определяется главным образом первым членом правой части, то есть для заданной жидкости начальной скоростью  $(w-v)$  ее движения относительно воздуха. При этом вязкость жидкости мало влияет на величину  $d_s$ . Формула (4.19) была проверена для распылителей сельскохозяйственных опрыскивателей и оказалась пригодной для расчетов при введении в первую часть поправочного множителя  $0,8 \pm 0,1$  при  $Q_w/Q_v > 5500$  и  $0,6 \pm 0,1$  при  $Q_w/Q_v \leq 5500$ .

Для выбора необходимого диапазона скоростей воздуха с целью получения эффективной дисперсности распыления построены графики зависимости диаметра капель (средний диаметр по Заутеру), от скорости воздушной струи из щелевого сопла при различных значениях исходных параметров, предложенных в формуле (11.29) Нукияма-Таназава.

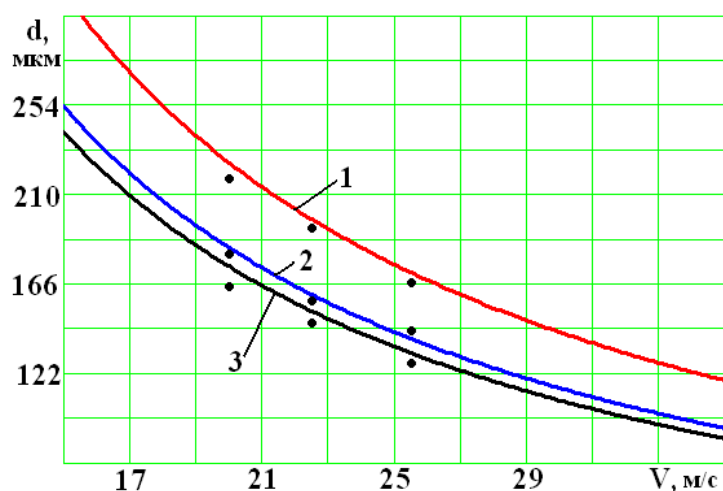


Рисунок 11.24 - Изменение диаметра капель от скорости воздушной струи при разной исследуемой жидкости  
1 - бензол; 2 – вода; 3 – глицерин.

Расчеты велись при следующих исходных данных параметрах щелевого распылителя конструкции КГАУ: диаметр питательной щелевой трубки 5 мм, что предотвращает забивание ее препаратами; расход жидкости 0,207 л/мин; коэффициент поверхностного натяжения  $72,5 \cdot 10^{-3}$  г/см, плотность жидкости  $0,998$  г/см<sup>3</sup>; скорость воздуха на выходе из воздушного сопла 20...26 м/с; скорость жидкости 0,17 м/с; при этом  $Q_w/Q_v \leq 5500$ .

Анализируя график (рисунок 4.16) можно отметить, что с увеличением плотности средний диаметр по Заутеру уменьшается.

Для получения среднего диаметра по Заутеру в пределах от 100 до 200 мкм, следует рекомендовать скорость воздушной струи для диспергирования рабочей жидкости от 16...32 м/с.

Чем меньше плотность, тем больше должна быть скорость воздуха. Плотность менялась от 0,61 (бензол); 0,998 (вода) и 1,48 (глицерин) г/см<sup>3</sup>.

1 –  $98,6 \cdot 10^{-3}$  г/см; 2 –  $72,5 \cdot 10^{-3}$  г/см; 3 –  $63,4 \cdot 10^{-3}$  г/см.

$$d_s = \left( d_s = \frac{585}{w - v} \cdot \left( \frac{\delta}{\rho} \right)^{0,5} \right) \cdot k, \quad (11.52)$$

где: k – коэффициент равный 0,82 (получен экспериментальным путем).

#### 11.11.1 Краткие выводы

1 В результате экспериментальных исследований агрофона определена высота установки распылителя над уровнем почвы, она составила 0,4 метра.

2 В результате экспериментальных исследований обоснована технологическая схема и установлено влияние управляемых факторов (щели питательной трубки, ширины и высоты воздушного сопла) на величину производительности распылителя.

3 С использованием планирования трехфакторного эксперимента по  $V_k$  плану определены оптимальные параметры распылителя и режимов его работы при условии выполнения исходных требований к качеству обработок. Согласно полученному уравнению регрессии по критерию максимальной производительности распылителя 0,207 л/мин, оптимальная щель питательной трубки составила 1,97 мм, высоты 0,51 мм и ширине 9,51 мм воздушного сопла.

4 Анализ дифференциальных и интегральных кривых распределения фракционного состава капель позволяет установить, что основная масса рабочей жидкости содержится в каплях диаметром от 140 до 230 мкм. Размеры капель варьируют в интервале 50...400 мкм (средний диаметр капли 186 мкм), а медианно-массовый диаметр составляет 206 мкм. Плотность покрытия предлагаемым распылителем составляет в среднем 122 капель на 1 см<sup>2</sup>. Степень использования весового количества рабочей жидкости составила 82 % и является достаточно высокой.

5 Скорость воздушной струи струйного элемента распылителя составляет на его выходе 22,5 м/с и снижается до 1 м/с на расстоянии от него 1 м, что достаточно для обработки гербицидами приствольных зон многолетних насаждений.

6 Увеличение щели питательной трубки при неизменных других факторах ведет к росту производительности распылителя: 2,31 л/мин при щели 3 мм и 0,6 л/мин при щели 1 мм. Увеличение щели питательной трубки выше 3 мм при постоянных значениях других факторов приводит к снижению производительности за счет снижения эжекции.

7 Зависимость степени покрытия обрабатываемого объекта от расстояния до распылителя подчиняется нормальному закону распределения.

8 Дальность при которой коэффициенте вариации равен 32% равна 0,6 м, что удовлетворяет условиям агротребованиям. Из этого следует, что при обработке приштамбовой зоны на рабочий орган следует устанавливать один распылитель.

9 С использованием планирования трехфакторного эксперимента по  $V_k$  плану определены оптимальные параметры рабочего органа и режимов его работы при условии выполнения агротехнических требований к качеству обработки. Согласно полученному уравнению регрессии по критерию максимальной площади обработки около штамбового пространства и минимальной площади двукратной обработки начальный угол установки рабочего органа составил 58...60 градусов.

10 Определен коэффициент определения среднего диаметра по Заутеру при использовании первой части уравнения предложенной Нукияма-Таназава, при расчете распылителя с воздушным и питающим соплом – щелевого типа, который равен 0,82.



## 12. Оптимизация параметров и режима работы протравителя семян

### 12.1. Программа исследований.

В разделе теоретических исследований обоснована технологическая схема протравливателя семян с позиций системного подхода, приведены расчеты параметров оптимизации дозатора семян и оптимизации поверхности распределительного конуса, а также расчет производительности протравливателя семян.

Цель экспериментальных исследований - проверить обоснованность теоретических предпосылок путем экспериментального определения оптимальных значений конструктивных параметров и режимов работы распределительного конуса и эжекционно-щелевых распылителей, а также определить недостающие для теоретических расчетов величины.

Программа лабораторных исследований предусматривала изучение следующих вопросов:

- 1) определение качества протравливания семян;
- 2) экспериментальное определение скважности потока семян;
- 3) определение оптимальной формы дозатора семян;
- 4) методом математического планирования эксперимента по критерию качества протравливания определить параметры дозатора, распределителя потока семян и режима работы эжекционно-щелевого распылителя.

### 12.2. Экспериментальная установка для обоснования параметров и режимов работы протравливателя семян

Для оценки качества протравливания семян (равномерности и полноты нанесения препарата) нами была изготовлена экспериментальная установка (рис. 12.1), которая позволяла обрабатывать семена протравителем при различной производительности установки по зерну с соответствующим изменением производительности распылителей, а также изменением скважности потока семян за счет сменных распределительных конусов (рис.12.2). На рисунке 12.3 представлено расположение распылителей в камере протравливания (8шт.), а на рисунке 12.4 - фотосъемка процесса распределения семян при их сходе с поверхности конуса

### 12.3 Методика экспериментальных исследований на установке

#### 12.3.1 Установка для определения производительности (W) и распределения семян

Установка (рис. 12.5 и рис. 12.6) состоит из: стола, на котором жестко укреплены стойка конуса 2 и стойка бункера 8, конус 3 устанавливается на стойке и фиксируется с помощью шпильки 1. Бункер 5 содержит цилиндрическую горловину 4, в которую вмонтирована заслонка 6. С

помощью выноса 7 с одной стороны жестко приваренному к горловине 4, а другой к основному ползуну 9, конус может перемещаться по стойке бункера



Рисунок 12.1 Общий вид лабораторной установки для протравливания семян.



Рисунок 12.2 Типы конусов для распределения семян.



Рисунок 12.3 Расположение распылителей в камере протравливания.



Рисунок 12.4 Процесс распределения семян при их сходе с распределительного конуса.

8. Ползун 9 фиксируется винтом 10 в нужном положении. Для точной подгонки зазора между конусом и горловиной имеется регулировочный винт 11, установленный в дополнительном ползуне 13, который фиксируется винтом 12.

Установка работает следующим образом: стол устанавливается в горизонтальном положении по гидроуровню. Отпуская винт 10, бункер поднимается на максимальную высоту, при которой обеспечивается возможность установки конуса на стойку 8. Конус устанавливается на

стойку и притягивается к ней шпилькой 1 так, чтобы юбка конуса лежала в горизонтальной плоскости, затем опускается основной ползун 9 и

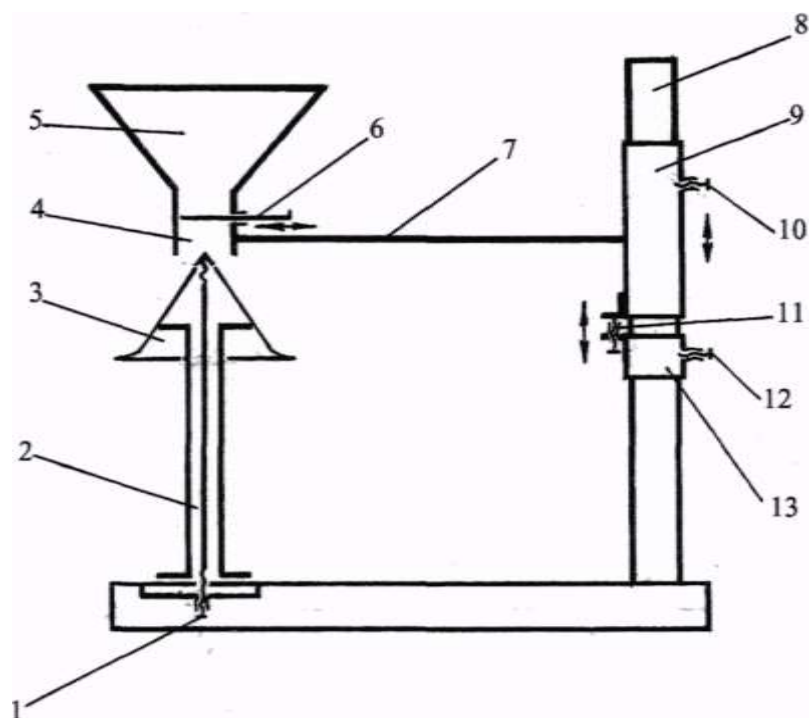


Рисунок 12.5. Кинематическая схема установки для определения производительности и распределения семян: 1 - шпилька; 2 - стойка конуса; 3 - конус; 4 - горловина; 5 - бункер; 6 - заслонка; 7 - вынос; 8 - стойка бункера; 9 - основной ползун; 10, 11, 12 - винт; 13 - дополнительный ползун.

устанавливается предварительный зазор, далее подводится дополнительный ползун 13 и винтом 11 точно устанавливается необходимый зазор.

Для определения конструктивных и режимных параметров работы установки в целом определялась производительность и характер распределения семян в пространстве при их сходе с распределительного конуса.

В опытах фиксировались: производительность установки; максимальная и минимальная дальность полета семян при их сходе с распределительного конуса (показатель распределения семян в пространстве).

Порядок проведения замеров: монтируется один из распределительных конусов на установку, устанавливается зазор между стенкой дозатора и поверхностью распределительного конуса, шаг измерений принимался равным 5мм. Взвешивалась на лабораторных весах порция зерна и засыпалась в накопительный бункер. Открытием заслонки с одновременным включением секундомера определяется время просыпания взвешенного зерна. Производительность определяется по формуле:

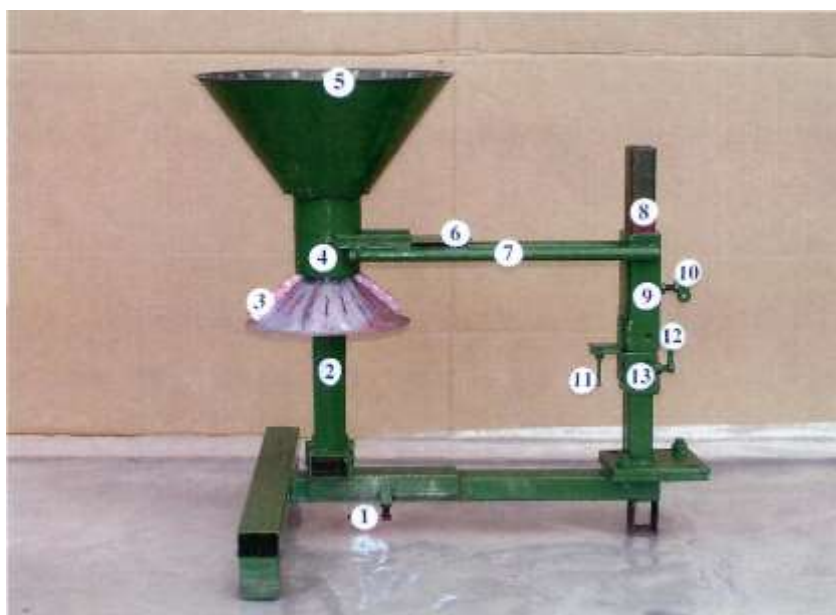


Рисунок 12.6. Установка для изучения скважности потока семян.

$$W = \frac{m}{t}, \quad (12.1)$$

где  $W$  — производительность установки, т/ч;

$m$  — масса засыпанного зерна, т;

$t$  — время полного просыпания зерна, ч.

После просыпания всей дозы измеряется внутренний и наружный диаметры распределения семян на плоскости, на расстоянии от основания конуса, с интервалом 15 см, до момента, когда наружный диаметр не изменяется. Этим определяются габаритные размеры установки. Распределение семян определяется по формуле:

$$S = \pi(r_n - r_e)^2 \quad (12.2)$$

где  $S$  — площадь кольца, занимаемая семенами, м<sup>2</sup>;

$r_n$  — радиус максимальной дальности полета семян, м;

$r_e$  — радиус минимальной дальности полета семян, м.

Визуально определяется равномерность распределение семян по площади. Далее изменяется зазор между конусом и подающей горловиной, и измерение параметров повторяется. Изменение зазора производится до тех пор, пока его величина не оказывает влияние на величину производительности.

12.3.3. Методика исследований угла наклона стенки дозатора бункера

Практическая проверка теоретических предпосылок схода зерна с бункера определялась на экспериментальной установке (Рис. 12.6).

Установка состоит из бункера (1), зерно с которого ссыпалось в направляющий цилиндр (3), перекрываемый шибером (заслонкой). Выдвижная юбка (4) устроена так, что к ней на выходе можно крепить конусы схода (5) с различным углом конуса.



На резьбовой шпильке (7) гайками (8) закреплялись распределительные конусы. Распределительный конус (6) устанавливался на шпильке ориентировочно, затем выдвигением юбки по линейке, прикладываемой к образующей распределительного конуса, выставлялась точное значение  $H$ . Практическое подтверждение теоретических исследований проводилось при  $H = 0$ .

Опыты проводились на трех углах распределительного конуса  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  и четырех углах конуса дозатора  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$ .

Сначала устанавливался конус дозатора и при постоянном конусе менялись распределительные конусы, причем  $H = 0$ . На каждом распределительном конусе при  $\alpha = 90^\circ$  дополнительно определялись изменения производительности в зависимости от зазора между образующей конуса и торцом выдвижной юбки. Эти измерения проводились с целью упрощения измерений при работе с протравителями.

12.3.3. Методика исследований производительности распылителей.

Установка состоит питающего устройства и распылителя с накопительными сосудами для сбора распыленного препарата (рис.12.7).

Питательное устройство предназначено для обеспечения гарантированного уровня жидкости в заборной емкости и регулировки этого уровня относительно точки распыла. Оно состоит из основания 1, относительно которого может перемещаться подвижная рамка 3, фиксируемая с помощью болта 2, к рамке жестко прикрепляется



Рисунок 12.7 - Настройка и определение производительности распылителей.

питательный сосуд 4 и заборный 11. Шланг 5 подает рабочую жидкость к распылителю 6, а шланг 7 воздух. Распыленный препарат собирается в накопительную емкость, состоящую из двух сосудов 10 и 9. Уровень

жидкости в заборном сосуде 11 поддерживается стабильно за счет вакуумного разряжения в питательном сосуде 4.

Производительность распылителя может регулироваться двумя способами:

а) Изменением уровня емкости относительно распылителя. Устанавливаем уровень жидкости относительно центра отверстия питательного жиклера равным нулю при давлении 1,5 (1; 2; 2,5 и 3) атм. Устанавливаем распылитель отдельно и направляем факел распылителя в накопительную емкость. Конструктивно сосуды устроены так, что обеспечивают максимальный сбор рабочей жидкости при одновременном отделении ее от воздуха. Устанавливаем продолжительность опыта 3 мин и трехкратную повторность на каждом уровне.

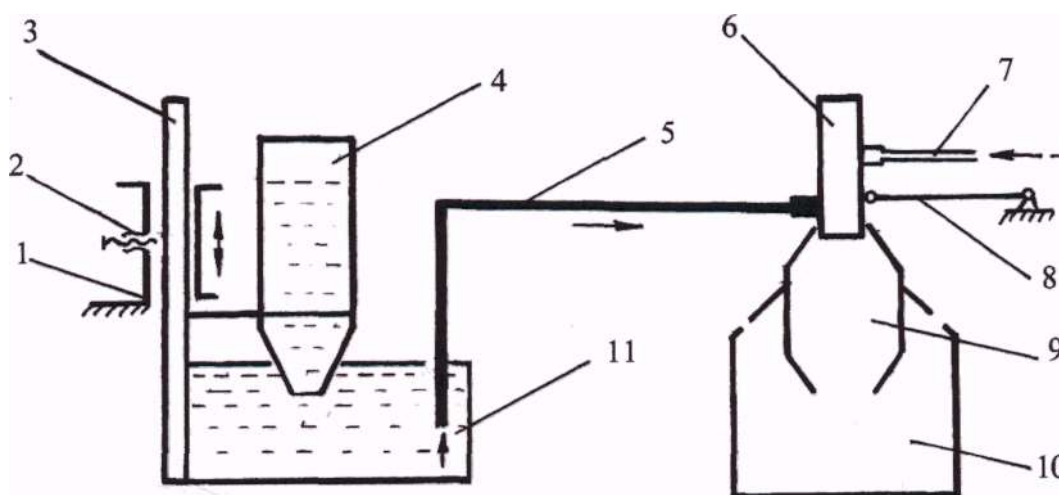


Рисунок 12.8 - Кинематическая схема установки для определения производительности распылителей:

1 - основание (стол); 2 - регулировочный болт; 3 - подвижная рамка; 4 - питательный сосуд; 5 шланг подачи препарата; 6 - распылитель; 7 - шланг подачи воздуха; 8 - кронштейн; 9 и 10 - накопительные сосуды; 11 - заборный сосуд.

После каждого опыта собранная жидкость взвешивается и определяется производительность распылителя. Затем с помощью подвижной рамки 3 через каждые 2 см понижается уровень жидкости до тех пор, пока распылитель будет инжесктивировать препарат и производятся замеры распыленной жидкости. По результатам измерений проводятся расчеты производительности распылителя.

б) Изменением давления воздуха.

Уровень питающей емкости устанавливается равным нулю, давление воздуха 1,5 атмосферы в течение 3 минут и в трехкратной повторности проводятся замеры распыленной жидкости, затем давление устанавливается 1; 2; 2,5 и 3 атм. При каждом значении давления производятся трехкратные замеры. По результатам измерений строятся графики зависимости производительности от давления. На основании

полученных зависимостей можно утверждать следующее, что наиболее эффективным способом регулирования количества распыленной жидкости на тонну обрабатываемого зерна предпочтение отдается регулировки за счет изменения давления воздуха.

12.3.4. Методика проведения эксперимента по протравливанию семян пшеницы на лабораторной установке.

Установка (рис. 12.9) работает следующим образом: технологический материал (зерно) поступает в бункер 8, подача материала в камеру протравливания 13, осуществляется открытием заслонки 7. Изменение величины подачи обеспечивается дозирующей втулкой 9. Втулка 9 перемещается дистанционно с помощью рычага 10, рукоятка которого выведена за пределы камеры протравливания, относительно вершины конуса 12. Величина зазора между дозирующей втулкой 9 и конусом 12 в вертикальной плоскости измеряется с помощью линейки. С целью торможения скорости скатывания и лучшего распределения семян, нижняя часть конуса выполнена в форме логисты. Конус укрепляется и центрируется на винте 11 с помощью гаек. В нижней части камеры протравливания 13 расположены по периметру распылители 14, факел распыла, которых направлен навстречу падающим семенам. Распылители 14 закреплены на штангах 15 так, что можно изменять их угол наклона и расположение относительно центра. Воздух от компрессора 4 подается к редуктору 5, необходимая величина рабочего давления воздуха в системе устанавливается по манометру 6. Краном 3 управляется подача воздуха к распылителям 14 через воздушные шланги 16.

Забор рабочей жидкости осуществляется из емкости 1 через питательные трубки 2. Все питательные трубки выполнены одинаковой длины ко всем распылителям. Изменение расстояния между жиклером распылителя и уровнем в емкости изменяется за счет перемещения питательной емкости относительно корпуса камеры протравливания. Фиксация емкости на заданном расстоянии осуществляется винтом 19. Камера протравливания смонтирована на стойках 17 так, что под ней размещается емкость 18 для сбора лабораторных проб. На конусах разной конфигурации за счет изменения производительности просыпания зерна определяется качество протравливания. Указанная цель достигается следующим образом: в бункер 1 засыпается зерно при закрытой заслонке 2. Подается заданное давление по манометру в распылители 14. Визуально определяется равномерность работы всех распылителей, открывается заслонка 2 (момент обработки зерна препаратом). По истечении зерна отключается подача воздуха. Из емкости 18 отбираются пробы для лабораторных исследований. Опыты повторяются в трех кратной повторности при каждом значении производительности (1; 3; 5 т) и геометрии конуса (30°; 45° и 60°).



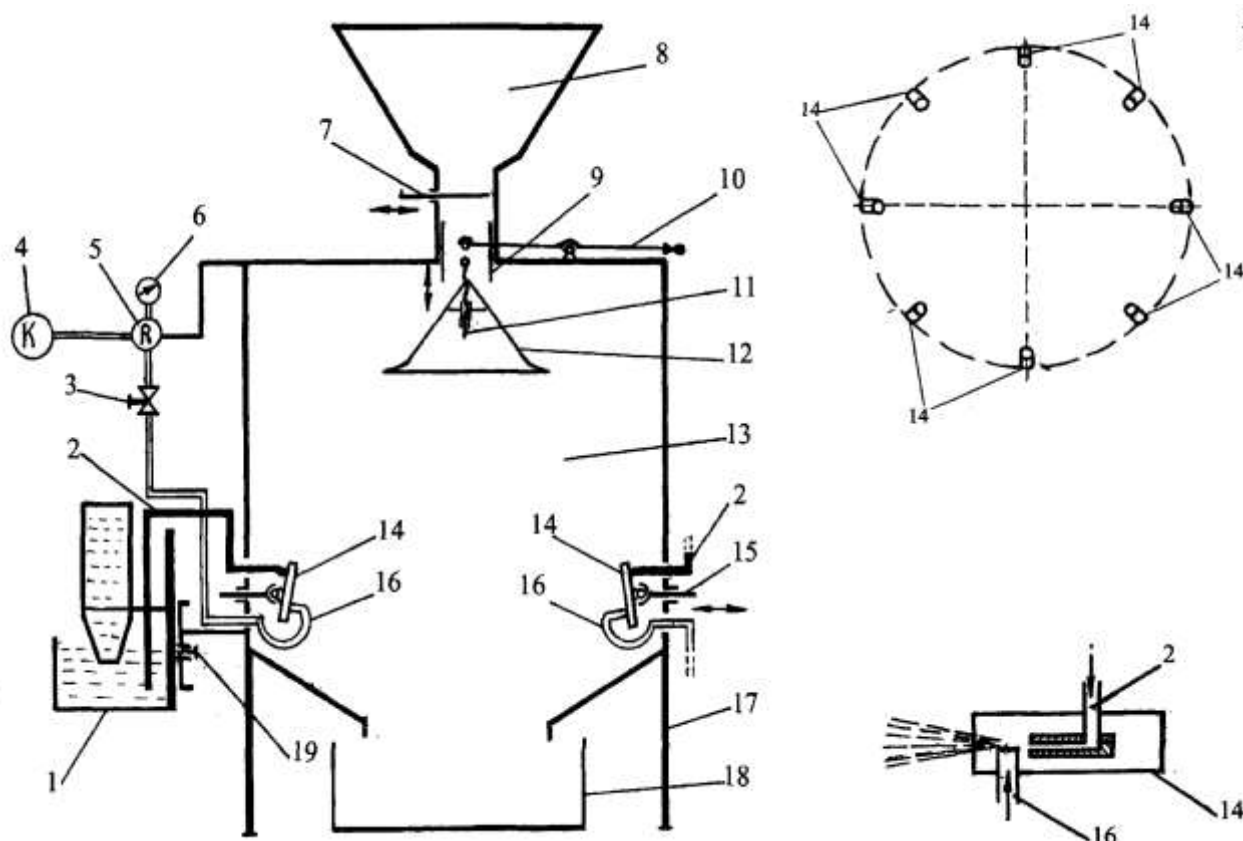


Рисунок 12.9 Кинематическая схема протравливателя семян: 1 - питательная емкость; 2 - питательная трубка; 3 - кран; 4 - компрессор; 5 - редуктор; 6 - манометр; 7 - заслонка; 8 - бункер; 9 - дозирующая втулка; 10 - рычаг; 11 - винт; 12 - распределительный конус; 13 - камера протравливания; 14 - распылители; 15 - штанга; 16 - воздушные шланги; 17 - стойка; 18 - емкость; 19 - винт.

### 12.3.5. Методика оценки качества протравливания семян.

Для проведения опытов применяли препарат Премис КС(25г/л), который используется для предпосевной обработки семян зерновых культур против комплекса болезней. Рекомендуемая норма расхода Премиса - 1,5 л/т. Действующее вещество препаратов - тритиконазол.

Методика определения тритиконазола в протравленных семенах.

Метод основан на изучении тритиконазола из протравленных семян органическим растворителем с последующим количественным определением действующего вещества газожиткосной хроматографии с применением ДЭЗ или ТИД.

Отбор проб производили в соответствии с « Унифицированными правилами отбора проб в сельскохозяйственной продукции, пищевых продуктов и объектов окружающей среды для определения микроколичеств пестицидов » (№ 2051-79 от 21.08.79).

Подготовку и кондиционирование колонок для ГЖХ выполняли: готовую насадку OV-17 засыпали в стеклянную колонку, уплотняли под

вакуумом в соответствии с правилами. Колонку устанавливали в термостате хроматографа, не подсоединяя к детектору, и стабилизировали в токе азота при температуре на 20° ниже предельного значения для выбранной неподвижной фазы в течение 8...10 часов.

Таблица 12.1 - Метрологическая характеристика метода

Метрологические параметры	Значение параметров, P = 0,95; n = 20
Предел обнаружения, мг/кг	5
Диапазон определяемых концентраций, мг/кг	5-125
Среднее значение определения, %	93,7
Стандартное отклонение, %	3,83
Доверительный интервал среднего значения, %	1,81

Капиллярную колонку с фазой диметилсиликона устанавливали в термостате хроматографа, не подсоединяя к детектору, и стабилизировали в токе азота при температуре 240° в течение 8...10 часов.

Приготовление стандартных растворов: навеску 10 мг тритиконозола помещали в мерную колбу на 100 мл, растворяли в ацетоне, доводили до метки и перемешивали. Из полученного раствора с концентрацией действующего вещества 100 мкг/мл путем разбавлений готовили растворы с содержанием тритиконозола 5 и 10 мкг/мл.

Проведения определения: навеску семян 20 г помещали в коническую колбу на 250 мл, приливали 10 мл дистиллированной воды и 40 мл ацетона. Экстракции проводили на аппарате для встряхивания в течение 10 часа. Экстракт фильтровали через бумажный фильтр в мерную колбу на 100 мл. Повторную экстракцию проводили с 50 мл ацетона в течение 30 мин.

Объединенный экстракт доводили в мерной колбе до метки, перемешивали и использовали для хроматографирования. В испаритель хроматографа вводили 2...3 мкл экстракта.

Расход препарата на 1 тонну семян рассчитывали по формуле:

$$X = \frac{A \cdot H_{np} \cdot V_p}{H_{ст} \cdot V_1 \cdot m \cdot 1000} \cdot K, \quad (12.3)$$

где  $X$  - содержание препарата в семенном материале, л/т;

$A$  - количество стандарта, введенное в хроматограф, нг;

$H_{np}$  - высота пика анализируемой пробы, мм;

$H_{ст}$  - высота пика стандарта, мм;

$V_p$  - конечный объем экстракта, мл;

$V_1$  - объем аликвоты, введенный в хроматограф, мкл;

$m$  - навеска семян, г;

1000 - коэффициент для пересчета содержания препарата на 1 тонну семян;

$K$  - поправочный коэффициент ( $K = 40$ ).

## 12.4. Методика обработки экспериментальных данных

Обработка экспериментальных данных проводилась методами общей теории статистически и теории планирования эксперимента в соответствии с ГОСТ 8.207-76. Для вывода эмпирических формул определяли экспериментально полученную функциональную зависимость.

Основной метод построения эмпирических формул: подбор типа формулы и нахождение коэффициентов к ней. Сравнивая графики типовой формулы, устанавливали их общее соответствие.

Результаты лабораторных экспериментов обрабатывали в соответствии с методами вариационной статистики.

По всем опытам вычислялось среднее значение варьирующих величин - среднее арифметическое  $M$ :

$$M = \frac{\sum x}{n}, \quad (12.4)$$

где  $x$  - численное значение измеримой величины;

$n$  - число измерений.

Одновременно для каждого вариационного ряда определяли среднее квадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \alpha_b^2}{n-1}}, \quad (12.5)$$

где  $\alpha_b$  - отклонение варианта от среднего арифметического.

Чтобы установить степень варьирования измеряемых величин, характеризующую изменчивость свойств изучаемых объектов, вычисляли коэффициент вариации

$$v = \frac{100\sigma}{M} \% . \quad (12.6)$$

Ошибку опыта определяли по формуле:

$$m = \frac{v}{\sqrt{n}} . \quad (12.7)$$

Показатель точности опыта определяли по формуле:

$$p = \frac{100m}{M} \% . \quad (12.8)$$

Методика обработки данных планового эксперимента.

В качестве параметров, характеризующих процесс, были выбраны расход семян, угол распределительного конуса.

Среднюю измерений эмпирического ряда параметров вычисляем по формуле:

$$n = \frac{\sum n_i x_i}{\sum x_i} , \quad (12.9)$$

где  $n_i$  - порядковый номер замера параметра;

$x_i$  - независимые переменные.

## 12.5. Методика планирования 2-х факторного эксперимента

Планирование эксперимента — это выбор плана эксперимента, удовлетворяющего заданным требованиям.

То есть это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

Известно, что наибольший эффект математическая статистика может принести тогда, когда математические методы используются как при планировании эксперимента, так и при обработке результатов опыта. Последовательное выполнение формализованных правил в процессе экспериментирования позволит выполнить основные требования: 1) сократить количество опытов; 2) уменьшить ошибку эксперимента; 3) получить математические модели, наиболее полно отражающие реальный процесс; 4) добиться наибольшей адекватности между математической моделью и реальным процессом.

Выбор типа плана зависит от выбранной математической модели, числа выбранных факторов и цели исследования.

Задача планирования — свести ошибку эксперимента к минимуму, получить неискаженную оценку ошибки и неискаженные оценки эффектов основных факторов.

Для отдельной оценки эффектов факторов и их взаимодействия необходимо применять полный факторный эксперимент (ПФЭ), а так как нелинейность модели может быть вызвана не только взаимодействиями между факторами, но и наличием квадратичных членов, то необходимо предусмотреть составление плана 2-го порядка.

Математическая модель второго порядка имеет вид:

$$y = b_0 + \sum^n b_i x_i + \sum_j^n b_{ij} x_i x_j + \sum^n b_{ii} x_i^2, \quad (12.25)$$

где  $b_{ij}$  - эффекты взаимодействий;

$b_{ii}$  - эффекты при квадратичных членах;

$b_0, b_i$  - эффекты при линейных членах;

$y$  - расчетное значение критерия оптимизации;

$x_i, x_j$  - независимые переменные (факторы);

$n$  - количество факторов.

При планировании эксперимента задавались следующими величинами:

1. Надежность результатов опыта —  $\alpha = 0,95$

2. Допустимой ошибкой —  $\varepsilon = \pm 3S$

Согласно, установили, что необходимое число повторений опытов равно 3.

Задачей исследования являлось изучение влияния конструктивных и режимных параметров протравливателя семян на качественные показатели процесса протравливания. При составлении плана эксперимента, прежде всего, назначают (выбирают) независимые факторы, исходя из априорной

(доопытной) информации или предварительного изучения объекта исследования.

С учетом проведенного обзора патентной и другой научно-технической литературы были выбраны факторы и уровни их варьирования, представлены в таблице 3.2.

При составлении плана 2-го порядка рационально использовать Вк. Этот план отличается тем, что его ядром является (ПФЭ) - полный факторный эксперимент, а звездные точки равны +1 и -1 [8, 41].

Таблица 12.2 - Факторы и уровни их варьирования

Уровни факторов	Факторы	
	Угол распределительного конуса, град	Производительность установки по зерну, т/ч
Верхний уровень $x_i = +1$	60	5
Основной уровень $x_{i0} = 0$	45	3
Нижний уровень $x_i = -1$	30	1

Для формализации задачи исследования и использования разработанных матриц планирования факторы кодировали по выражению:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\nu}, \quad (12.11)$$

где  $x_i$  - кодированное значение фактора, верхний уровень обозначался +1, нижний - 1;

$X_i$  - натуральное значение фактора;

$X_{0i}$  - натуральное значение фактора на нулевом уровне;

$\nu$  - натуральное значение интервала варьирования фактора.

Натуральное значение интервала варьирования

$$\nu = \frac{X'_i - X''_i}{2}, \quad (12.12)$$

где  $X'_i$  - натуральное значение фактора на верхнем уровне;

$X''_i$  - натуральное значение фактора на нижнем уровне.

Регрессионный анализ результатов эксперимента проводили на ЭВМ по программе, которая представлена в приложении 6. Перед проведением регрессионного анализа проводили проверку однородности дисперсии по критерию Кохнера [8, 14, 41]. Рассчитанные значения критерия Кохнера  $G_p$  сравнивали с табличными значениями  $G_m = 0,05$  при 5%-ном уровне значимости и числе степеней свободы  $f_1 = 1$  и  $f_2 = N$  [41]. При этом значении  $N$  берется равным числу опытов в матрице плана.

При однородности дисперсий рассчитывали коэффициенты регрессии математической модели по результатам опытов  $V_k$ , используя уравнения [41].

Для оценки адекватности представления результатов эксперимента математической модели применяли общую методику, сущность которой может быть представлена так:

Остаточная сумма квадратов дисперсий ( $SS_r$ ) при проведении повторяющихся опытов может быть разложена на две суммы - сумму квадратов, определяющую неадекватность результатов эксперимента ( $SS_{lf}$ ), и сумму квадратов, связанную с дисперсией, характеризующей ошибку опытов ( $SS_y$ ), т.е.

$$SS_r = SS_{lf} + SS_y \quad (12.13)$$

Для проверки адекватности вычисляли  $F$  - критерий Фишера:

$$F = \frac{S_{lf}^2}{S_y^2} = \frac{SS_{lf}}{f_{lf}} / \frac{SS_y}{f_y} \quad \text{и} \quad (12.14)$$

сравнительно с табличным значением. Здесь  $f_{lf}$  и  $f_y$  - соответственно числа степеней свободы, отвечающие сумме  $SS_{lf}$  и  $SS_y$ .

Дисперсия неадекватности

$$S_{lf}^2 = \frac{k \sum_{u=1}^k (y_u - \bar{y})^2}{N - n - 1}, \quad (12.15)$$

где  $y_u$  - среднее значение критерия оптимизации в  $u$ -м опыте при  $k$  повторностях;

$n$  - число факторов;  $n=0,1,2,\dots$ ;

$\bar{y}$  - значение критерия оптимизации, вычисленное по уравнению регрессии.

Дисперсия, характеризующая ошибку опыта, определялась по формуле:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^k \sum_{i=1}^k (y_{iu} - y_u)^2}{N(k-1)}, \quad (12.16)$$

где  $y_{iu}$  - значение критерия оптимизации в параллельных опытах.

После получения адекватной математической модели второго порядка определяли координаты оптимума и изучали свойства поверхности отклика в окрестностях оптимума.

Для анализа и систематизации уравнение второго порядка приводили к типовой канонической форме вида:

$$Y - Y_s = B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + \dots + B_{nn}X_n^2, \quad (12.17)$$

где  $Y$  - значение критерия оптимизации;

$Y_s$  - значение критерия оптимизации в оптимальной точке;

$X_1, X_2, \dots, X_n$  - новые оси координат, повернутые относительно сторон  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ;

$B_{11}, B_{22}, B_{nn}$  - коэффициент регрессии в канонической форме.

При каноническом преобразовании уравнения второго порядка [41] производился перенос начала координат в новую точку  $S$  и поворот старых осей на некоторый угол в факторном пространстве. Для этого

продифференцировали функцию отклика по каждой переменной и, приравняв к нулю частные производные, решали полученную систему уравнений. Решением системы  $n$  -линейных уравнений находили координаты оптимума. В случае двух независимых переменных, придавая различные фиксированные значения  $Y_c$ , получали серию изолиний на плоскости, на основании которых проводился анализ уравнения регрессии [8, 41].

После канонического преобразования и определения вида поверхности отклика проводили ее анализ с помощью двухмерных сечений.

Для этого в модель подставляли нормализованные значения всех факторов кроме двух. В полученном выражении определяли центр поверхности отклика путем взятия частных производных по каждому фактору и приравнивания полученных выражений к нулю и строили полученную поверхность [8, 41].

Придавая различные значения критерию оптимизации, строили серию кривых равного выхода (изолиний) в области допустимых значений варьирования независимых переменных. По кривым сечений судили об изменении величины критерия оптимизации в зависимости от натуральных значений рассматриваемых факторов.

Таким образом, выбрали параметры, характеризующие процесс ультрамалообъемного протравливания семян и рассмотрели математические выражения для их вычисления. Рассмотрели методику обработки экспериментальных данных (регрессионного анализа) при использовании матриц  $B_k$  и разработали программу регрессионного анализа для ЭВМ.

## 12.6. Результаты экспериментальных исследований

### 12.6.1. Оптимальные конструктивные и режимные параметры протравливателя семян.

Режимы работы и конструктивные параметры протравливателя семян, влияющие на качественные показатели, являются количественными факторами, и задача сводится к выбору их оптимальных величин. Для этого использовали  $B_k$  (план). Изучалось влияние двух факторов и фиксированы их значения на оптимальных уровнях. Факторы, интервалы и уровни варьирования представлены в таблице 12.3.

В качестве критерия оптимизации (отклика) нами принята полнота протравливания семян, которая зависит от нормы расхода препарата и обрабатываемого материала.

Уровни факторов выбирали таким образом, чтобы оптимальные их значения, рассчитанные теоретически или учитывающие существующие ограничения, попадали в центр интервала варьирования.

Максимальным значением для первого фактора  $x_1$ , являлся угол наклона боковой поверхности конуса к горизонту, равный  $\alpha = 60^\circ$  значение снижалось до  $\alpha = 30^\circ$ , что и соответствовало интервалу. Его варьирования.

Таблица 12.3. - Факторы, интервалы и уровни варьирования

Факторы	Кодированное обозначение	Интервал варьирования	Уровни факторов		
			-1	0	+1
Угол распределительного конуса ( $\alpha$ ),град	$x_1$	15	30	45	60
Производительность установки по зерну( $W$ ), т/ч	$x_2$	2	1	3	5

Для второго фактора  $x_2$  значения производительности установки принимались из соображений работоспособности, где звездным точкам соответствовала производительность 1 и 5 т/ч, а положения, соответствующие интервалу варьирования, определялись по установленным зависимостям.

Использовать в качестве управляемых факторов другие конструктивные параметры предлагаемого протравливателя, мы считаем нецелесообразным, так как они не являются определяющими для качественной обработки семян. Что касается режимов работы, то они ограничены пропускной способностью дозатора семян при просыпании на распределительную поверхность и углом естественного откоса для данного сыпучего материала.

Значения первого фактора устанавливали изготовлением конусов с соответствующей градацией, второй фактор фиксировался величиной открытия дозатора на заданную производительность установки.

На основании этих рассуждений были выбраны интервалы варьирования и уровни факторов, значения которых занесены в таблицу 12.3. Матрица планирования представлена в таблице 12.4. Опыты проводили согласно описанной выше методике. Порядок проведения опытов выполнялся согласно таблице случайных чисел. Средние величины параметров оптимизации представлены в таблице 12.3. Результаты экспериментальных исследований по определению основных качественных показателей и оптимизации параметров процесса протравливания семян обработали по известным методикам.

После математической обработки экспериментальных данных получили следующие уравнения регрессии для качества протравливания:

$$Y_1 = 97,27 - 2x_1 - 3x_2 - 7,24x_1^2 - 4,24x_2^2, \quad (12.18)$$

где  $Y_1$  - процентное значение действующего вещества (полнота протравливания) от заданной нормы, %.



Поверхность отклика изучали с помощью двумерных сечений для более детального представления о поверхности отклика.

Выполнив каноническое преобразование, получили уравнение

$$\frac{dy_1}{dx_1} = -2 - 14,48x_1, \quad (12.19)$$

$$\frac{dy_1}{dx_2} = -3 - 8,48x_2 \quad (12.20)$$

Решая систему линейных уравнений, находим координаты центра поверхности отклик

$$x_1 = -0,138; \quad x_2 = -0,354.$$

Подставляя найденные значения  $x_1$  и  $x_2$  в уравнение (12.18), определяем значение параметра оптимизации в центре поверхности отклика:  $Y_s = 97,943$ .

Угол поворота осей равен нулю градусов, т.е. уравнение (12.18) не имеет парных взаимодействий, а коэффициенты регрессии в канонической форме равны  $B_{11} = -7,237$ ;  $B_{22} = -4,237$ .

Инварианты  $J_1 = -11,474$ ;  $J_1 = -11,474$ ;

Уравнение регрессии в канонической форме:

$$Y - 97,943 = -7,237X_1^2 - 4,237X_2^2 \quad (12.21)$$

Или

$$\frac{X_1^2}{\frac{Y-97,943}{-7,237}} + \frac{X_2^2}{\frac{Y-97,943}{-4,237}} = 1 \quad (12.22)$$

Поверхность отклика представляет собой эллипсоид (рисунок 12.19), а ее центр - экстремум (максимум), так как канонические коэффициенты имеют одинаковые знаки.

После подстановки различных значений отклика  $Y$  в канонические уравнения (12.21) было получено семейство сопряженных изолиний (рисунок 12.20). Расположение элементов производительности в области эксперимента напоминало поверхность «эллипса». Центр эксперимента лежит за пределами области эксперимента. Максимальная степень обработки в данном случае будет при угле распределительного конуса  $45^\circ$  и производительности установки 3 т/ч.

№ опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	Значение ДВ, %	
1	+1	60	5	+1	+1	+1	+1	+1	80	ПФЭ
2	+1	30	5	-1	+1	-1	+1	+1	84	
3	+1	60	1	+1	-1	-1	+1	+1	86	
4	+1	30	1	-1	-1	+1	+1	+1	90	
5	+1	60	3	+1	0	0	+1	0	88	Звездные точки
6	+1	30	3	-1	0	0	+1	0	92	
7	+1	45	5	0	+1	0	0	+1	90	
8	+1	45	1	0	-1	0	0	+1	96	
9	+1	45	3	0	0	0	0	0	98	Опыты в центре плана
10	+1	45	3	0	0	0	0	0	97	
11	+1	45	3	0	0	0	0	0	98	
12	+1	45	3	0	0	0	0	0	99	

Таблица 12.4. - Матрица планирования при оптимизации качественных показателей работы протравливателя семян

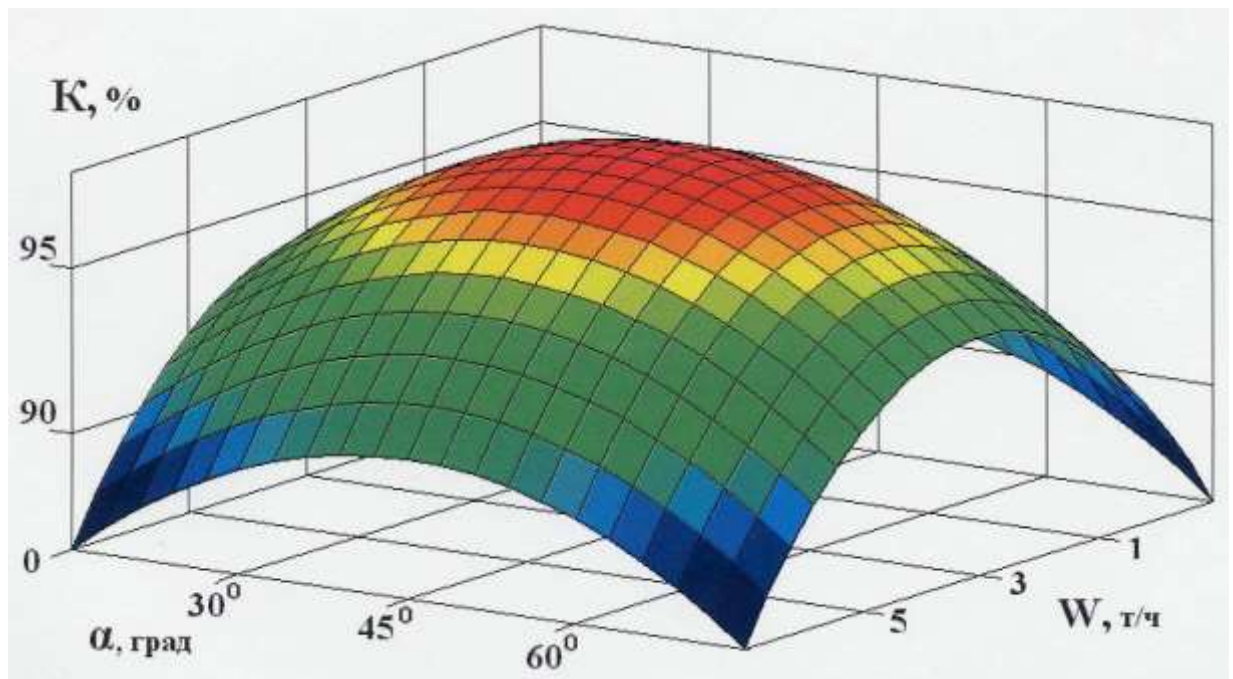


Рисунок 12.10. - Поверхность зависимости качества обработки от угла распределительного конуса и производительности установки.

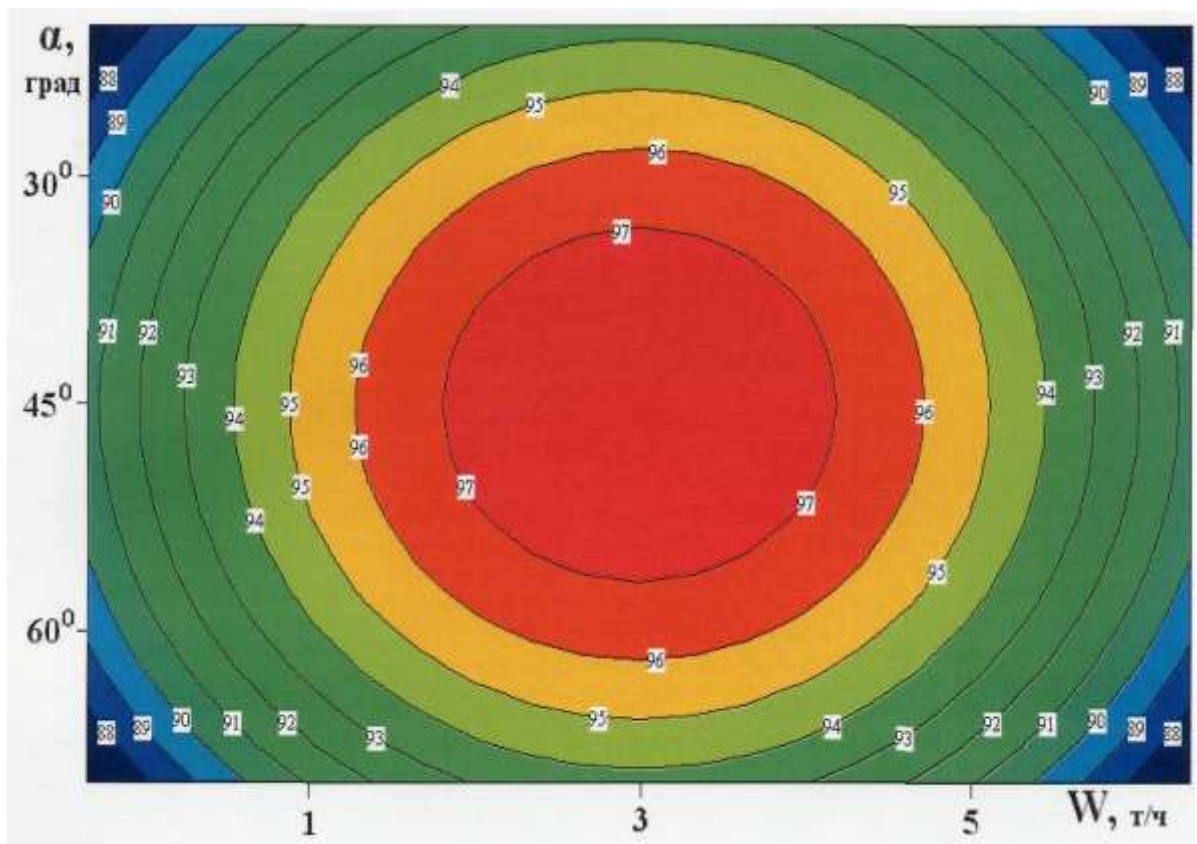


Рисунок 12.11. - Двумерное сечение поверхности отклика качества протравливания в зависимости от производительности установки  $W$  и угла  $\alpha$  плоскостью  $X_1SX$ .

Таблица 12.5. - Характеристика двумерных сечений поверхности отклика по производительности установки

Коэффициенты центра сечения		Отклик в центре сечения $Y_{XS}$ , %	Угол поворота оси координат $\alpha$ , град.
$X_{1S}$	$X_{2S}$		
-0,138	-0,354	97,943	0

Анализ графика (рис. 12.11) показал, что изменение угла распределительного конуса ( $\alpha$ ) влияет на процесс больше, чем производительность установки, так как ось ординат меньше оси абсцисс. Это и характеризует более резкое изменение параметров качества обработки семян от угла распределительного конуса, поэтому  $x_1$  и  $x_2$  образуют сечения в виде эллипса.

Анализ поверхности отклика с помощью двумерных сечений показывает, какое значение действующего вещества (полнота протравливания, %) наносится на семена при различных режимах работы и настройки протравливателя. Например, при производительности установки ( $W$ ) равной 1т/ч и угле распределительного конуса  $\alpha = 30^\circ$  качество обработки семян( $k$ ) будет равно 93% или при  $W = 3$ т/ч и  $\alpha = 60^\circ$  качество обработки семян равно 96%.

Оптимальным значением угла распределительного конуса следует считать  $45^\circ$ , а производительность установки - 3 т/ч.

12.6.2. Зависимость производительности протравливателя от параметров дозатора и распределителя

Разработанные нами теоретические предпосылки движения семян из бункера на конусообразный распределитель семян были проверены экспериментом. Данные, полученные опытным путем, представлены в таблице 12.6. На теоретический график были нанесены точки, полученные экспериментально. Графики строились для каждого распределительного конуса при различном угле наклона стенки дозатора бункера. Из графика на рис. 12.12 следует, что сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований находится в диапазоне допустимых значений и ошибка опыта не превышает 5 - процентного уровня.

Оптимальным выбран угол наклона стенки дозатора, равный  $45^\circ$ , так как при меньших значениях угла в процессе проведения опыта наблюдалось сводообразование, а также производительность установки несоответствовала заданным требованиям. При значениях угла более  $45^\circ$  скорость истечения сыпучего материала возрастает, что приводит к резкому увеличению начальной скорости движения семян при попадании на распределительный конус, из-за этого снижается время пребывания обрабатываемого материала в зоне обработки его препаратом.

Таблица 12.6. - Параметры и режимы движения семян из дозатора на распределитель

Угол распределительного конуса $\alpha$ град	30°			45°			60°		
	15°	30°	45°	15°	30°	45°	15°	30°	45°
Предельный расход сыпучего материала $q^{пр.з}$ , т/ч	0,440	1,166	1,240	1,144	1,430	1,815	1,606	1,914	1,2160
Относительный расход сыпучего материала $\frac{q^{пр.з}}{q_0} = f(\gamma_1)$	0,20	0,53	0,54	0,52	0,65	0,80	0,73	0,83	0,99

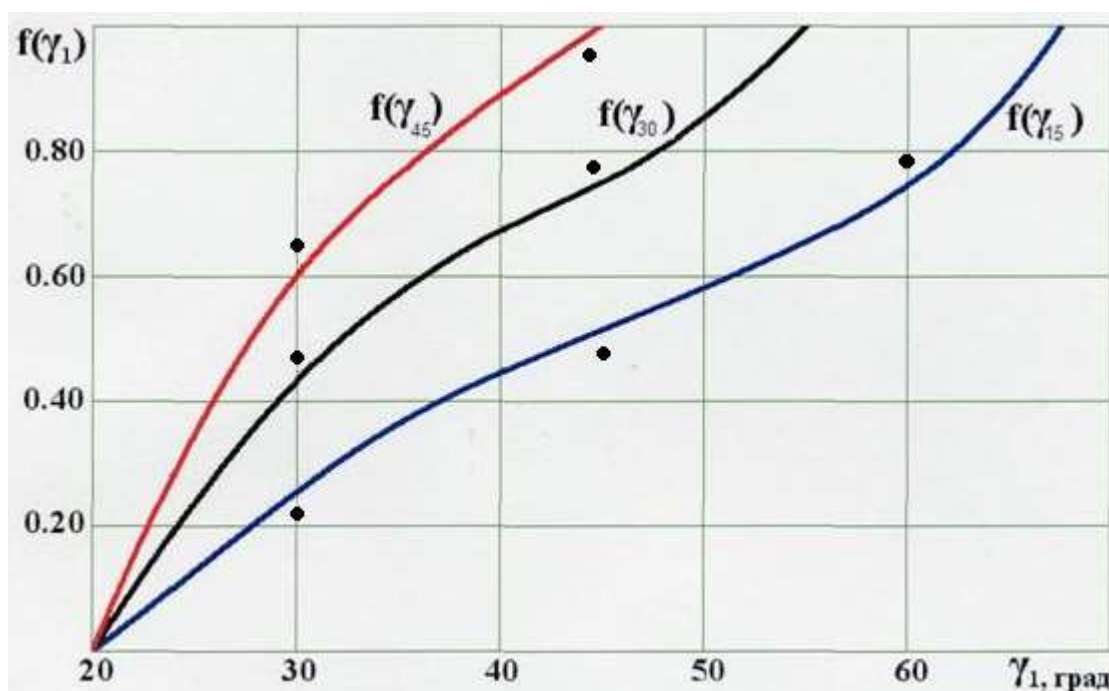


Рисунок 12.12. - Сходимость теоретических расчетов параметров дозатора и распределителя с результатами опытов.

12.6.3 Зависимость производительности установки (W) от величины зазора (h) между конусом и стенкой дозатора.

Полученные графические зависимости (рис. 4.5) показывают, что производительность протравливателя зависит как от величины зазора между конусом и юбкой дозатора, так и от геометрии конуса. Сопротивление сходу семян с конуса 30° больше чем с конуса 45° и 60° соответственно. Характер изменения кривых показывает, что они имеют две ярко выраженные зоны.

Зона нелинейной зависимости определяется в диапазоне зазоров от 13 мм при конусе 60° до 18 мм при конусе 30°. При этом производительность остается практически на одном уровне около 1 т/ч. протравливателя выше одной тонны в час может быть описано для

При производительности выше 1 т/ч зависимости имеют функцию, приближающуюся к линейной. Уравнение производительности всех типов конусов уравнением типа:

$$W = 6,5848 \cdot 10^{-3} \cdot h^2, \quad (12.22)$$

где  $W$  - производительность установки, т/ч;

$h$  - величина открытия дозатора, мм;

$6,5848 \cdot 10^{-3}$  - эмпирический коэффициент.

Сумма квадратов отклонений равна:

$$S_k = \sum_i (W_i - 6,5848 \cdot 10^{-3} \cdot h_i^2)^2, \quad (12.23)$$

где  $S_k$  - сумма квадратов отклонений ( $S_k = 0,04837$ ).

Проверка по критерию Кохрена:

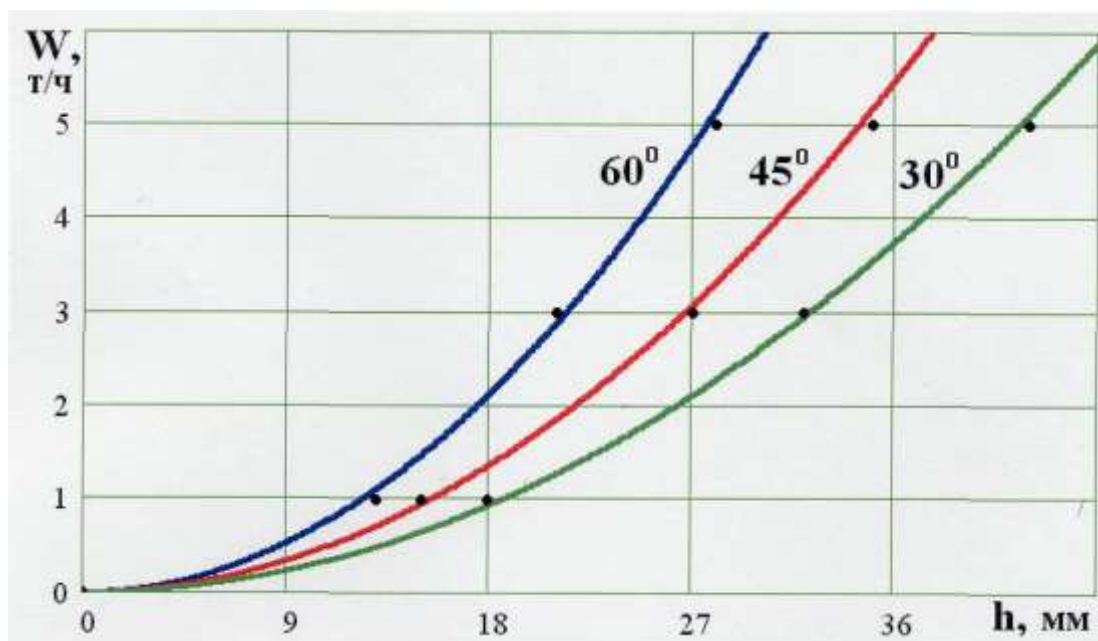


Рисунок 12.13. - Зависимость производительности установки ( $W$ ) от величины зазора ( $h$ ) между конусом и стенкой дозатора.

$$G_p = \frac{S_y^2}{S_k}, \quad (12.24)$$

где  $S_y$  - квадрат максимального отклонения ( $S_y = 0,0264$ ).

Для конуса с углом распределения 60° критерий Кохрена  $G_p = 0,54584$ , для конуса 45°  $G_p = 0,631$ , для конуса 30°  $G_p = 0,248$ . Так как значение расчетного критерия Кохрена меньше табличного значения  $G_T = 0,841$ , то уравнение адекватно.

Выбранные теоретически параметры дозатора позволили достичь проектируемой производительности 5 т/ч при всех геометриях исследуемых конусов.

Таким образом, в диапазоне изменений нижнего и верхнего факторов характер протекание процесса носит линейный характер, что удобно как для проведения исследований, так и для разработки алгоритма управляющих воздействий и регулировок на стадии промышленного использования протравливателя.

12.6.4 Закономерности скважности потока семян при сходе с конической поверхности.

Исследования проводились при одинаковой производительности установки.

При проведении исследований использовали три типа распределительных конусов с целью определения оптимальной скважности распределения семян в пространстве для наилучшей их обработки распыленным протравителем. Под понятием скважность понимается отношение общего числа семян к единице объема, занимаемого ими при сходе с распределительного конуса, то есть эта пустота (расстояние) между семенами в пространстве. Скважность характеризует вероятность наибольшего попадания препарата на семена при обработке, то есть чем больше расстояние между семенами при их вращательном падении в камере протравливания, тем больше вероятность их полной и качественной обработки. Это достигается за счет разности первоначальных скоростей при сходе семян из дозатора на конус, чем больше угол конуса, тем больше дальность паллета семян и один и тот же объем частиц распределяется в большем объеме пространства.

Результаты исследований показывают (рис. 12.14), что площадь распределения увеличивается с увеличением угла конуса. При увеличении угла конуса в два раза площадь распределения увеличивалась всего лишь в 1,45 раза.

Таким образом, изменение площади распределения и соответственно скважность сходящего потока семян можно осуществлять изменением геометрии конуса при одинаковых параметрах дозатора по отношению к конусу.

В интервале экспериментально полученных данных по  $S$  можно с достаточно высокой вероятностью, не превышающей погрешность наблюдений, представить полученную зависимость в виде функции:

$$S = -68,502 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha^2 + 9,4618 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha, \quad (12.25)$$

где  $S$  - площадь распределения семян после схода с распределительного конуса, м;

$\alpha$  - угол наклона распределительного конуса, град.

Сумма квадратов отклонений равна:

$$S_k = \sum_i [S - (-68,502 \cdot 10^{-6} \alpha_i \cdot \alpha_i + 9,4618 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha_i)]^2, \quad (12.26)$$



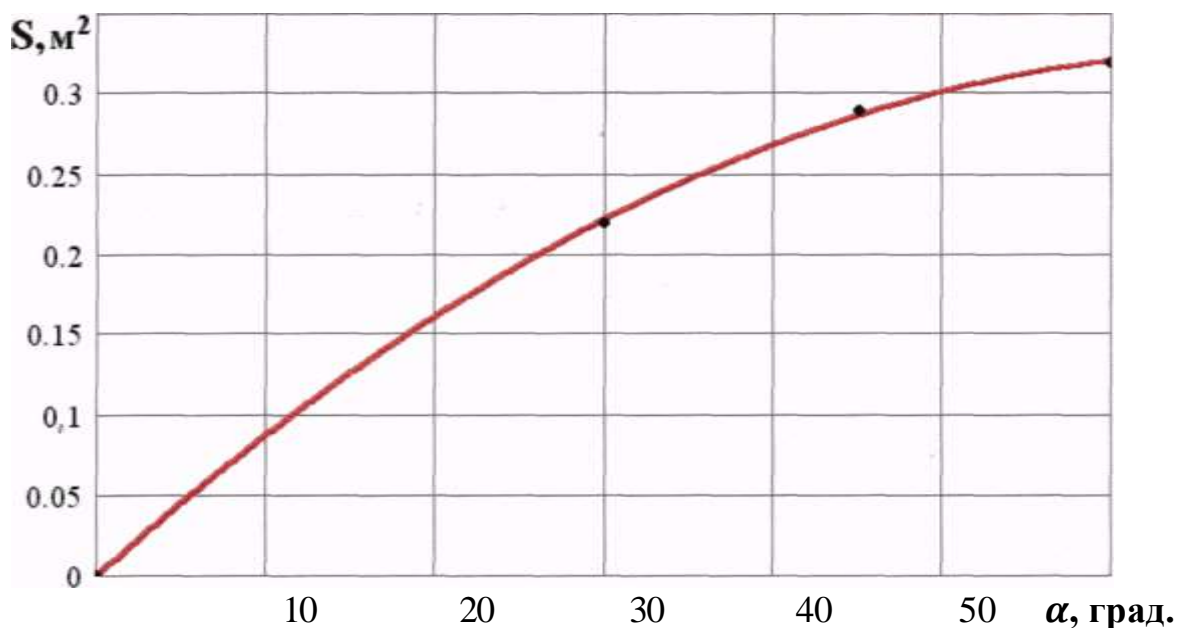


Рисунок 12.14. - Зависимость площади распределения ( $S$ ) семян от угла распределительного конуса( $\alpha$ ).

где  $S_k$  - сумма квадратов отклонений( $S_k = 1,46789 \cdot 10^{-5}$ ).

Проверка по критерию Кохрена:

$$G_p = \frac{S_y^2}{S_k}, \quad (12.27)$$

где  $S_y^2$  - квадрат максимального отклонения( $S_y^2 = 8,61745 \cdot 10^{-6}$ ).

Расчетное значение коэффициента Кохрена  $G_p = 0,58706$  меньше табличного  $G_T = 0,841$  значит уравнение адекватно.

Таким образом, площадью распределения и соответственно скважностью сходящего потока можно управлять изменением геометрии конуса при одинаковом расстоянии от него до дозатора.

Скважность потока оценивалась путем наблюдения замеров при фотографировании потока с последующим анализом фотоснимков (рис.12.15...12.17). При угле конуса  $30^\circ$  сходящий поток с поверхности конуса практически стабилен и имеет вид стабильно сползающей сыпучей массы (рис. 12.15).

Скважность невысокая, вращение семян слабовыраженное. Явно наблюдается теневой эффект, то есть каждое последующее семя с очень высокой вероятностью находится в тени летящего впереди.

При угле конуса  $60^\circ$  сходящий поток с поверхности конуса сильно рассредоточен, с высокой скважностью и хаотичен. Семена находятся в сложном вращательном движении. Скорость потока очень высокая, что создает неблагоприятные условия для обработки семян защитно-стимулирующими веществами.





Рисунок 12.15. - Характер распределения сходящего потока с поверхности конуса при  $\alpha = 30^\circ$ .



Рисунок 12.16. - Характер распределения сходящего потока с поверхности конуса при  $\alpha = 60^\circ$ .

Наиболее оптимальным визуально выглядит поток, сходящий с угла конуса  $45^\circ$ . Во-первых, скорость потока несколько меньше чем при  $60^\circ$ . Сквозность достаточно высокая, практически исключая «теневой»

эффект, вместе с тем поток имеет четко выраженные границы и компактен по размерам. Большинство семян находится во вращательном движении. Анализ полученных данных позволяет отдать предпочтение углу распределительного конуса  $\alpha = 45^\circ$ . При этом все показатели для обеспечения качества процесса протравливания наиболее благоприятны. Так, скважность потока при  $\alpha = 45^\circ$  на 19,4% лучше, чем при  $\alpha = 30^\circ$ . И как следствие, «теневой» эффект при оптимальном угле конуса существенно снижается.

При угле распределительного конуса  $60^\circ$  все показатели процесса не уступают оптимальному значению угла распределителя, исключая скорость движения семян, которая существенно выше оптимальной при  $\alpha = 45^\circ$ , что снижает качество протравливания (главным образом полноту рис.12.11).

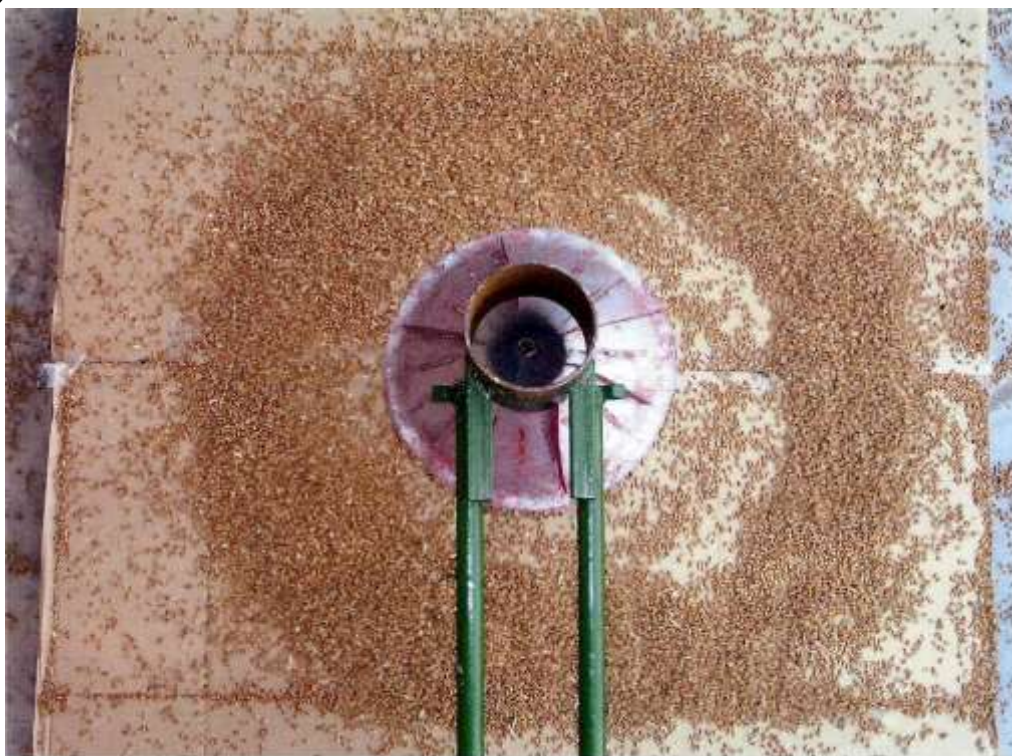


Рисунок 12.18. – Характер распределения сходящего потока с поверхности конуса при  $\alpha = 45^\circ$ .

Таким образом, доказано оптимальное значение угла распределительного конуса  $\alpha = 45^\circ$ , создающего благоприятные предпосылки для качественного нанесения препарата на обрабатываемые семена.

#### 12.6.5. Результаты исследований распылителя

В предложенной технологической схеме протравливателя семян использован новый распылитель, разработанный нами в соответствии с патентом РФ на изобретение(№2227455). Технологическая схема и принцип работы распылителя представлен на рис. 12.18.



Таблица 12.7 – Зависимость скважности семян от угла распределительного конуса

Показатель распределения семян	Угол распределительного конуса $\alpha$ , град		
	30	45	60
1. Скважность потока семян, $m^2$ при $W = 3m/ч$	0,228	0,283	0,324

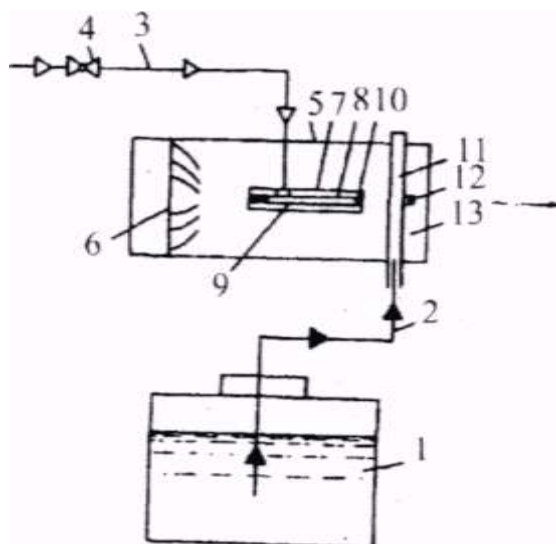


Рисунок 12.18 Технологическая схема устройства для обработки семян.

Для качественной обработки семян в камере протравливания, на наш взгляд, целесообразен распылитель, предложенный КубГАУ для ултрмалообъемного опрыскивателя с турбо диффузором и струйным элементом согласно патенту Российской Федерации № 2058740.

Преимущество этого устройства состоит в том, что распылитель создает круглую струю рабочей жидкости, вследствие чего семена обрабатываются более качественно по сравнению с плоским факелом распыла, создаваемым серийными дисковыми распылителями.

Устройство работает следующим образом. Воздух от компрессора попадает в ресивер, а из него - в редуктор постоянного давления. Выход сжатого воздуха под определенным постоянным давлением подключен с помощью воздухопроводов 3 к воздушному соплу струйного элемента 7 избыточного давления распылителя 5. При выходе воздуха из щелевого сопла струйного элемента 7 в камере смешивания 13 создается разрежение. В связи с этим из резервуара 1 по всасывающей магистрали 2 рабочая жидкость эжектируется в питательный трубопровод 11, закрепленный в корпусе распылителя 5, и смешивается с воздушным потоком, всасываемым струйным элементом 7 через турбо диффузор 6. Всасываемый воздушный поток и воздух из щелевого сопла транспортируют рабочую жидкость в виде мелких капель на обрабатываемый объект. Отключение подачи рабочей жидкости производится пробковым краном 4 воздухопровода.

Норма расхода рабочей жидкости и дисперсность распыла регулируется изменением положения питательной трубки относительно распылителя и изменением давления воздуха с помощью редуктора.

Основными факторами, определяющими величину производительности распылителя, являются: расположение распылителя относительно питательной емкости и давление воздуха в струйном элементе распылителя.

12.6.6. Зависимость производительности распылителя от расположения питательной емкости.

Исследованиями Борисовой С.М. доказано изменение производительности нового распылителя эжекционно - щелевого типа от положения уравнильной питательной емкости: чем оно выше, тем больше производительность и наоборот. Результаты исследований нового распылителя, предложенного нами для протравливателя семян, представлены на рис. 12.19.

Анализ графической зависимости позволяет утверждать, что с понижением уровня питательной емкости относительно щели струйного элемента распылителя практически пропорционально снижается и его производительность. При расстоянии между распылителем и уровнем емкости, равном 10 см, происходит полное прекращение подачи рабочей жидкости, а при расстоянии между ними равном нулю, производительность распылителя достаточная для надежного протекания процесса протравливания.



Рисунок 12.19. - Зависимость производительности распылителей ( $W_{расп.}$ ) при 0,15МПа от высоты ( $H$ ) питательной емкости.

Следует отметить, что во всем диапазоне расстояний визуально определяемого изменения качества распыла не наблюдалось. Характер зависимости в диапазоне производительности распылителя 10-30 л/ч можно описать с достаточно высокой точностью функцией вида (приложение 9):

$$W_{расп.} = -220,74 \cdot 10^{-6} \cdot e^H - 2,6235 \cdot H + 31,055, \quad (12.28)$$

где  $W_{расп.}$  - производительность распылителя, л/ч;

$H$  - высота распылителя относительно питательной емкости, мм;

$e$  - экспонента;

Сумма квадратов отклонений равна:

$$S_k = \sum_i (Y_i - 31,055 - 220,74 \cdot 10^{-6} \cdot e^{X_i} - 2,6235 \cdot X_i)^2 \quad (12.29)$$

где  $S_k$  - сумма квадратов отклонений ( $S_k = 0,56148$ ).

Проверка по критерию Кохрена:

$$G_p = \frac{S_y^2}{S_k} \quad (12.30)$$

где  $S_y^2$  - квадрат максимального отклонения ( $S_y^2 = 0,30134$ ).

Так как значение расчетного  $G_p = 0,5367$  критерия Кохрена меньше табличного значения  $G_T = 0,681$ , то уравнение адекватно ( $G_p \leq G_T$ ).

Адекватность модели доказана по критерию Кохрена ( $G_p \leq G_T$ ), таким образом, изменением расстояния положения питательной емкости относительно распылителя можно управлять подачей рабочего раствора с высокой точностью и полученной линейной зависимостью.

12.6.7 Зависимость производительности распылителя от изменения давления воздуха при постоянной высоте его относительно уровня жидкости в питательной емкости.

Результаты зависимости производительности распылителя  $W$  от давления воздуха  $P$  в воздушной магистрали представлены на рис. 12.20. Графические зависимости получены при изменении давления воздуха в системе от 0,05 до 0,3 МПа.

Как показывают полученные данные, в диапазоне давлений от нуля до 0,1 МПа тенденция изменения производительности имеет характер, отличный, чем при давлениях от 0,1 до 0,3 МПа. Проведенная оценка качества распыла на давлениях до 0,1 МПа дала неудовлетворительный результат.

Характер изменения производительности распылителя можно описать с достаточно высокой точностью функцией вида (приложение 10):

$$W_{расп.} = e^{\left(\frac{11,726}{e^P} + 6,0632 \cdot \ln(P) - 1,1073 \cdot P\right)} \quad (12.31)$$

где  $W_{расп.}$  - производительность распылителя, л/ч;

$P$  - рабочее давление воздуха в системе, МПа;

$e$  - экспонента.

Сумма квадратов отклонений равна:

$$S_k = \sum \left[ W_{расп.} - e^{\left(\frac{11,726}{P} + 6,0632 \cdot \ln(P) - 1,1073 \cdot P\right)} \right]^2,$$

где  $S_k$  - сумма квадратов отклонений ( $S_k = 3,34509$ ).

Проверка по критерию Кохрена:

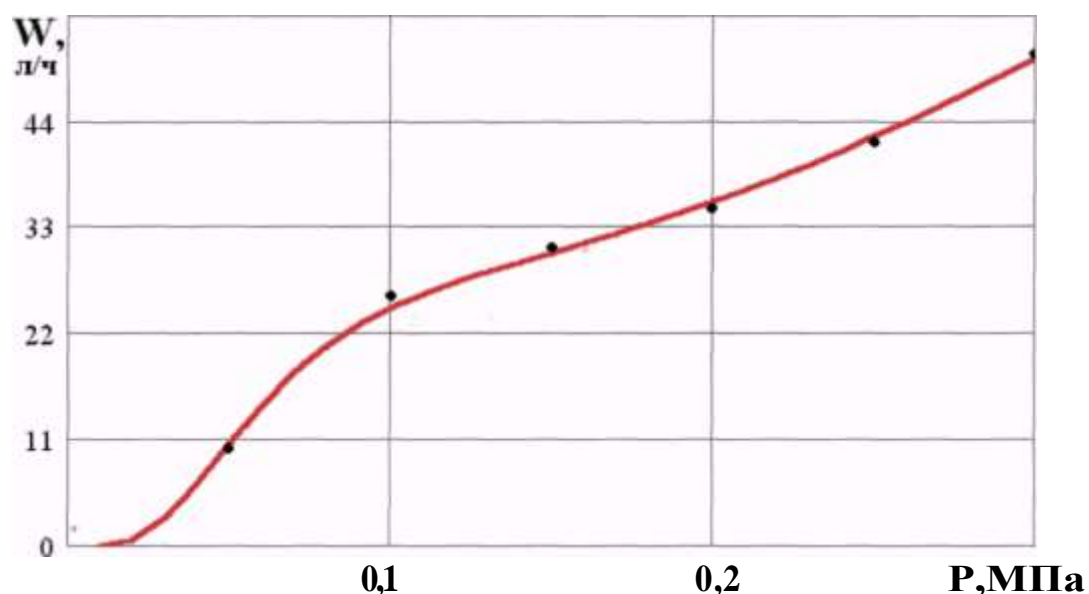


Рисунок 12.20. - Зависимость производительности распылителей ( $W_{расп}$ ) от давления воздуха ( $P$ ) при их одинаковой высоте относительно питательной емкости.

$$G_p = \frac{S_y^2}{S_k} \quad (12.32)$$

где  $S_y^2$  квадрат максимального отклонения  $S_y^2 = 1,71248$ ). Так как значение расчетного  $G_p = 0,51194$  критерия Кохрена меньше табличного значения  $G_T = 0,681$ , то уравнение адекватно ( $C_p \leq G_T$ ).

Оценка качества распыла показывает, что с увеличением давления улучшается качество распыла и длина его конуса. Но при данной вязкости раствора рабочей жидкости качество распыла удовлетворяет требованиям поставленной задачи во всем диапазоне изменения давлений (от 0,1 до 0,3 МПа).

Таким образом, как показывают результаты, функции исследуемых параметров в достаточно высоком интервале варьирования имеют четко выраженные линейные зависимости. Это позволяет разработать достоверные практические рекомендации по регулировке и настройке протравливателя на стадии рабочей эксплуатации, что обеспечит высокую эффективность работы протравливателя, позволит улучшить его эксплуатационные характеристики, снизить интеллектуальную нагрузку на потребителя, повысить гарантии качественного его использования.

Следует отметить, что все попытки добиться какого-либо приемлемого результата по протравливанию попутным падающему потоку семян распылом рабочей жидкости, были безуспешными. Поэтому оценка качества и полноты протравливания семян определялась при создании встречного распыла рабочей жидкости навстречу падающему потоку семян. Экспериментальная установка позволяет:

- а) варьировать производительностью подачи семян путем:

- изменения величины зазора между конусом распределителя и юбкой дозатора;

- изменения геометрии устанавливаемых распределительных конусов.

б) варьировать производительностью распылителей путем:

- изменения величины давления нагнетаемого воздуха;

- изменения высоты питательной емкости относительно расположения распылителя.

в) оценивать качество протравливания путем:

- попутного распыла рабочей жидкости к падающему потоку семян;

- встречного распыла рабочей жидкости к падающему потоку семян;

- оценки изменения расположения и угла наклона распылителей относительно падающего потока семян.

#### 12.6.8. Зависимость качества протравливания семян озимой пшеницы при различных режимах работы

Первой задачей для нанесения препарата на семена было определение оптимального расположения распылителей относительно падающего потока семян при сходе с распределительного конуса. Наиболее оптимальным оказалось встречное расположение распылителей направлению падающего потока, так как время контактирования препарата с семенами при этом возрастает.

Второй задачей было определение рабочего давления воздуха в распылителях для эжектирования препарата, так как от величины давления зависит дисперсность распыленной жидкости, и дальность этой струи. Давление, равное 0,15МПа, давало лучшую равномерность и полноту нанесения препарата на семена. Давление до 0,15МПа слабо распыливало жидкость и давало окрашивание точечное и слабоинтенсивное при визуальном наблюдении и результатах опыта. При давлении более 0,15МПа происходило сильное распыление препарата, часть которого осаждалась на стенки протравливателя и за его пределы. Визуальные наблюдения получили подтверждение по полученным результатам опытов.

Исходя из дальности струи, было выбрано окончательное расположение и количество распылителей.

На рисунке 12.21 представлена схема рационального расположения восьми распылителей в камере протравливания через равные промежутки по окружности ( $\beta = 45^\circ$ ) и под углом к горизонту ( $\delta = 70^\circ$ ).

Как показано на рисунке 12.21, восемь распылителей обеспечивают смыкание всех факелов распыла, создавая сплошную зону обработки потока семян. Расположение их под углом  $\delta = 70^\circ$  позволяет увеличить время контакта семян с раствором рабочей жидкости, обеспечивая полноту и равномерность протравливания (табл. 12.8).

Если при анализе сечений поверхности отклика по производительности установки  $W = 3\tau/\chi$  и  $\alpha = 45^\circ$  плоскостью

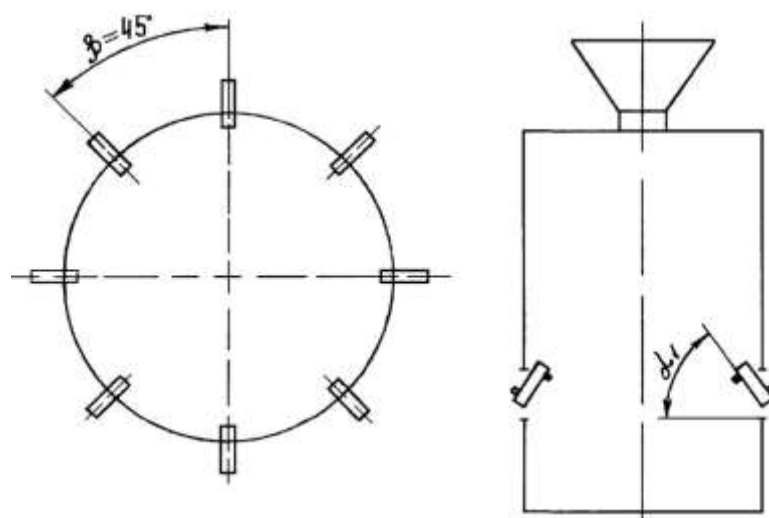


Рисунок 12.21. - Схема рационального расположения эжекционно - щелевых распылителей и факелов распыла.

Таблица 12.8. - Полнота протравливания семян в экспериментальном протравливателе

Конструктивные и режимные параметры протравливателя семян	Показатель качества обработки семян	Количество семян обработанных при данной полноте в относительном объеме
	Полнота нанесения препарата, %	
1. Угол распределительного конуса $\alpha = 45^\circ$ , $W = 3$ т/ч	97	100
2. Угол $\alpha = 30^\circ$ , $W = 3$ т/ч	95	67
3. Угол $\alpha = 60^\circ$ , $W = 3$ т/ч	96	79

#### 12.6.9. Краткие выводы

1. Угол распределительного конуса ( $\alpha$ ) влияет на процесс больше, чем производительность установки.

2. Оптимальным значением угла распределительного конуса следует считать  $45^\circ$ , а производительность установки - 3 т/ч.

3. При значениях угла более  $45^\circ$  скорость истечения сыпучего материала возрастает, что приводит к резкому увеличению начальной скорости движения семян при попадании на распределительный конус, в этой связи снижается время пребывания обрабатываемого материала в зоне обработки его препаратом.

4. Производительность протравливателя зависит как от величины зазора между конусом и поверхностью дозатора, так и от геометрии конуса. При зазоре между конусом и поверхностью дозатора  $h = 25$  мм производительность установки при  $\alpha = 30^\circ$  составляет  $W = 1,8$  т/ч, при  $\alpha = 45^\circ$ ,  $W = 2,7$  т/ч, а при  $\alpha = 60^\circ$   $W = 4,2$  т/ч.

5. Величиной площади распределения и соответственно скважностью сходящего потока семян можно управлять изменением геометрии конуса



при одинаковых параметрах дозатора по отношению к конусу. Так, например, при  $\alpha = 30^\circ$  площадь  $S = 0,22\text{м}^2$ , а при  $\alpha = 60^\circ$   $S = 0,32\text{м}^2$ .

6. Основными факторами, определяющими величину производительности распылителя, являются: расположение распылителя относительно питательной емкости и давление воздуха в струйном элементе распылителя. Так производительность одного распылителя составила  $W_{расп} = 3,75\text{л/ч}$  при давлении воздуха  $0,15\text{МПа}$ .

7. С уменьшением уровня питательной емкости относительно щели струйного элемента распылителя практически пропорционально снижается и его производительность.

8. За счет ультромалообъемного нанесения препарата на 30% снижается расход препарата и раствора.

9. Полнота протравливания семян предлагаемым устройством обеспечивается в соответствии с агропотребованиями при следующих параметрах: угол распределительного конуса  $\alpha = 45^\circ$ , производительность установки  $W = 3\text{т/ч}$  и норма расхода раствора препарата  $10\text{ л/т}$ . При этом 100% пропускаемого объема семян обрабатывается с полнотой протравливания 98%, в то время как при угле распределительного конуса  $\alpha = 60^\circ$  - только 79% пропускаемого объема обрабатывается с полнотой 96%, а при угле  $\alpha = 30^\circ$  - всего 67%, что не соответствует агропотребованиям. Равномерность протравливания семян во всех опытах составила 98%.

10. Разработана методика инженерного расчета предлагаемого протравливателя семян с использованием предложенной номограммы для заданной производительности (подачи) зерна можно подобрать расход раствора рабочей жидкости, давление воздуха и положение уравнительной емкости.

## 13. Общая программа и методика экспериментальных исследований

### 13.1. Цель и задачи экспериментальных исследований

В предыдущей главе были представлены теоретические исследования, которые позволили выяснить влияние коэффициента внутреннего трения компонентов смесей на их расслоение при истечении из бункеров сельскохозяйственных машин. Также показано, что расслоению смесей способствует явление сводообразования.

В связи с тем, что до настоящего времени проблема расслоения смесей изучена недостаточно глубоко, трудно на основе только теоретических исследований определить закономерности протекания явления сегрегации, а также факторы, влияющие на его возникновение.

Поэтому целью экспериментальных исследований является выявление и изучение факторов, влияющих на фрикционное расслоение смесей, истекающих из бункеров сельскохозяйственных машин, а также экспериментальная проверка разработанных технических средств, снижающих их расслоение.

Цель экспериментальных исследований обуславливает решение следующих основных задач:

1. Определение физико-механических свойств туков и их смесей.
2. Выявление наиболее значимых факторов, влияющих на расслоение смесей при их истечении из бункеров.
3. Определение степени влияния наиболее значимых факторов на расслоение смесей.
4. Определение зоны максимальной интенсивности расслоения смесей при их истечении из бункеров.
5. Проверка эффективности функционирования разработанных технических средств для снижения расслоения смесей при их истечении из бункеров.

### 13.2. Оборудование и приборы для проведения экспериментальных исследований

Исследования влияния наиболее значимых факторов на расслоение смесей минеральных удобрений проводились на экспериментальной установке, составной частью которой являлся бункер (рис. 3.1а,б).

Размеры бункера в частности его высота, диаметры его верхнего и нижнего оснований, а также его объем были определены с использованием геометрического моделирования в масштабе 1:2 к натуральному бункеру НРУ-0,5. Среднестатистическая масса туков, вмещающаяся в модельный бункер составила от 180 до 230 кг.

Бункер крепился на жесткой раме и был предназначен для исследования нормального вида истечения сыпучего тела как наиболее распространенного в производстве вида истечения.

Для аккумуляции смеси, истекающей из бункера, имеется диск с расположенными по его диаметру 20 контейнерами. Вращательное движение диску от двигателя передается с помощью червячной передачи.

Диск и бункер расположены по отношению друг к другу таким образом, что при вращении диска контейнеры для аккумуляции смеси перемещаются строго под выпускным отверстием бункера.

Проверка эффективности применения разработанных технических средств для предотвращения или снижения расслоения смесей минеральных удобрений проводилась на экспериментальной установке (рис.3.1).



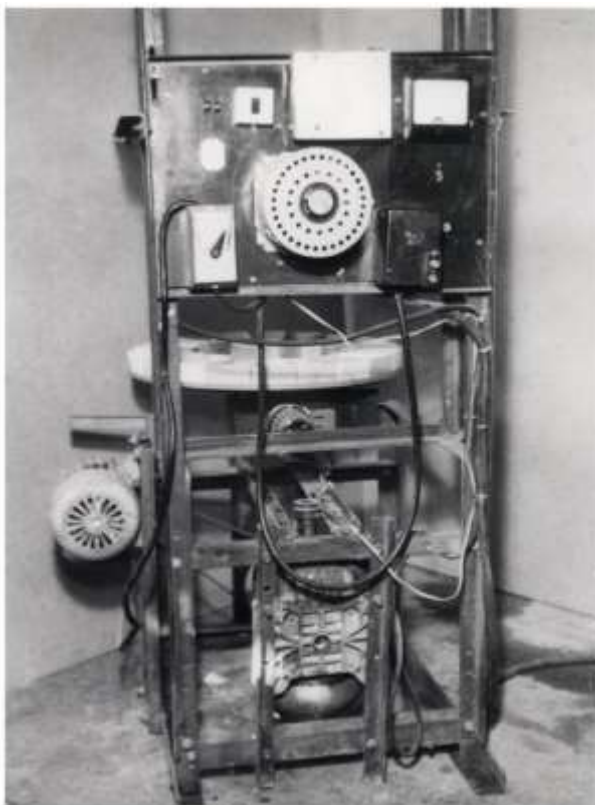


Рисунок 13.1 - Экспериментальная установка для исследования расслоения смеси при истечении из бункера

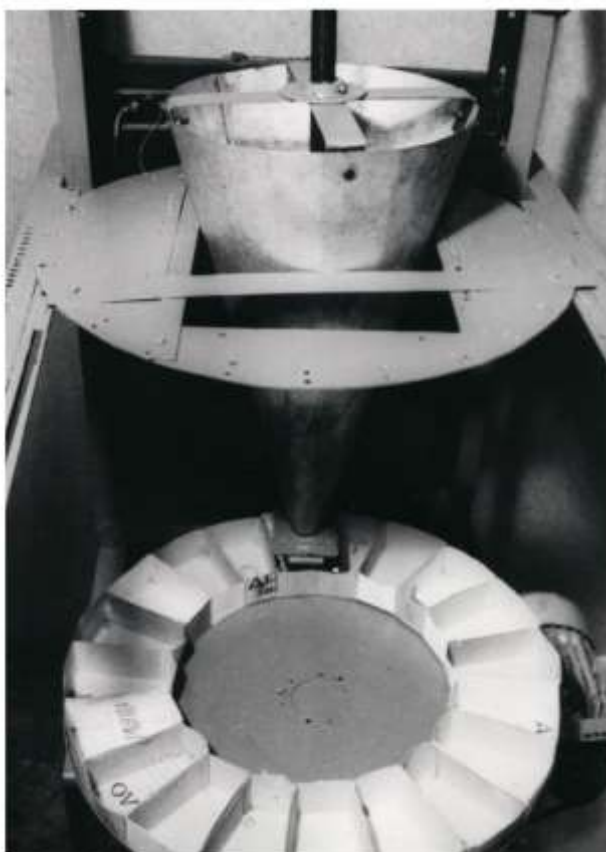


Рисунок 3.2 - Экспериментальная установка с системой активного привода

Экспериментальные исследования расслоения смесей проводились на устройствах:

- с активным приводом (рис. 13.2)

- с упругими элементами (рис. 13.3)
- без элементов для снижения расслоения смесей (рис.13.4)

Для определения зоны максимальной интенсивности расслоения смесей при истечении из бункеров был изготовлен специальный конический полубункер, передняя стенка которого выполнена из прозрачного оргстекла (рис.3.5).



Рисунок 13.3 - Экспериментальная установка с системой упругих элементов

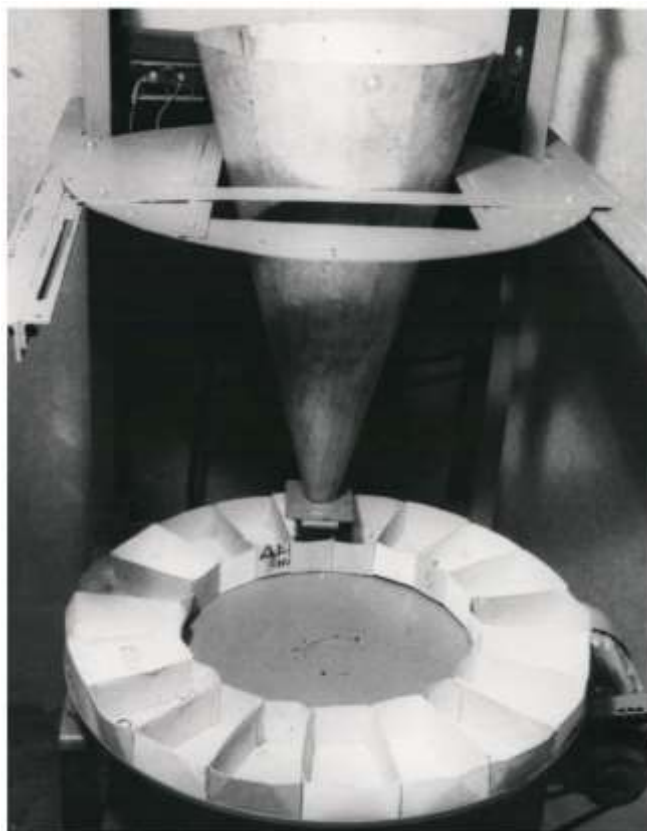


Рисунок 13.4 - Экспериментальная установка



Рисунок 13.5 - Специальный конический полубункер

Угол наклона образующих бункера к вертикали составлял  $10^\circ$ . Высота бункера, его верхнее и нижнее основания составляли соответственно 350, 280 и 50мм. В нижней части бункера установлена задвижка.

Для решения поставленной задачи бункер по высоте был разделен на несколько равных отрезков (слоев).

Кроме того, были использованы:

- фотоаппарат Zenit - ТТЛ;

- весы ВЛКТ - 500 М.;

- установка для определения фрикционных свойств туков и их смесей ТМ – 21.

### 13.3. Методика определения наиболее значимых факторов, влияющих на расслоение смесей при их истечении из бункеров

Так как проблема расслоения смесей при их истечении из бункеров изучена недостаточно полно и из имеющихся литературных источников трудно выделить наиболее значимо влияющие факторы, то перед планированием экспериментов был проведен доопытный эксперимент и априорное ранжирование факторов.

Отбор факторов осуществлялся на основании предварительного тщательного изучения литературных источников, анализа результатов предварительных опытов, а также коллективного мнения компетентных специалистов, занимающихся изучением вопроса истечения сыпучих тел из бункеров.

При проведении априорного ранжирования факторов компетентным специалистам были предложены анкеты, в которых в рандомизированном порядке были расположены выбранные 10 факторов (табл. 3.1).

В табл. 3.1. представлены, в основном, факторы, которые не зависят от физико-механических свойств сыпучего материала.

По результатам опроса вычислялся коэффициент конкордации  $W$  (согласованности), определяющий степень согласованности мнений специалистов, по формуле [8]:

$$W = \frac{12S}{m_0^2(n^3 - n)}, \quad (13.1)$$

где  $S$  - сумма квадратов отклонений;

$m_0$  - число опрашиваемых специалистов;

$n$  - число факторов.

Сумма квадратов отклонений вычислялась по формуле [8]:

$$S = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^{m_0} a_{ij} - L \right)^2, \quad (13.2)$$

где  $a_{ij}$  - ранг (порядковый номер при опросе)  $i$ -го фактора у  $j$ -го специалиста;

$L$  - среднее значение сумм рангов по каждому фактору, определяемое по формуле

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_0} a_{ij}}{n}, \quad (13.3)$$

Таблица 13.1 - Факторы, влияющие на расслоение смеси при истечении из бункеров

№ п/п	Обозначение фактора	Наименование фактора
1	$Z_1$	Соотношение компонентов смеси
2	$Z_2$	Форма выпускного отверстия
3	$Z_3$	Площадь выпускного отверстия
4	$Z_4$	Размер частиц
5	$Z_5$	Форма частиц
6	$Z_6$	Вид бункера
7	$Z_7$	Степень заполнения бункера
8	$Z_8$	Колебания
9	$Z_9$	Коэффициент внешнего трения
10	$Z_{10}$	Угол наклона стенок бункера

Значение коэффициента конкордации изменяется в интервале от 0 до 1, и чем больше его значение, тем больше согласованность мнений у специалистов.

Значимость коэффициента конкордации проверялась по критерию Пирсона- $\chi^2$ , так как величина  $m_0(n-1)W$  имеет  $\chi^2$ -распределение с числом степеней свободы  $f' = n - 1$  [8, 14, 41].

Расчетное значение  $\chi^2$ -распределения определялось по формуле

$$\chi_{расч}^2 = m_0(n-1)W, \quad (13.4)$$

Если вычисленное значение  $\chi^2$ -распределения больше табличного при соответствующем числе степеней свободы, то коэффициент конкордации значимо отличается от 0 и можно утверждать, что согласованность исследователей не является случайной [8, 14, 41].

После этого, для наглядности представления результатов данного эксперимента, строится средняя априорная диаграмма рангов распределения факторов, отражающая коллективное мнение специалистов.

С помощью полученной диаграммы проводилась оценка значимости факторов и отбирались наиболее значимые для проведения многофакторного эксперимента.



### 13.4. Методика планирования экстремального эксперимента

Планирование эксперимента - это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения задач с требуемой точностью [8]. Для решения поставленных выше задач в данной работе используется методика планирования экстремального эксперимента.

Выбор методики планирования экстремальных экспериментов объясняется тем, что позволяет с помощью полученного уравнения поверхности отклика и его анализа определить оптимальные условия протекания исследуемого процесса.

В настоящее время в теории планирования экспериментов разработано множество планов, обладающих различными свойствами.

В данной работе используется ортогональный план второго порядка, обладающий тем преимуществом, что позволяет получить независимые оценки коэффициентов регрессии с минимальной дисперсией [8]. Также преимущество данных планов состоит и в малом объеме вычислений, так как все коэффициенты регрессии определяются независимо друг от друга [14].

Величина звездного плеча при ортогональном планировании будет равна [15]: при  $n = 3 - \alpha' = 1,215$ .

При ортогональном плане на число нулевых точек не накладывается никаких ограничений, поэтому для сокращения экспериментальной работы применяют  $n_0 = 1$ .

Для решения поставленной задачи был составлен план эксперимента, в котором назначены интервалы и уровни варьирования факторов (табл. 3.2).

За критерий оптимизации был принят тангенс угла наклона линии, характеризующей изменение соотношения компонентов смеси.

Исследования проводились на модельной смеси, состоящей из гранул пластмассы и семян сорго. Для каждого опыта составлялась смесь с заданным соотношением компонентов, тщательно перемешивалась и контролировалось соотношение компонентов, определяемое при установившемся стационарном истечении смеси из бункера (рис. 3.6)

Таблица 13.2 - Интервалы и уровни варьирования факторов

Уровни	Кодированное значение	Факторы		
		$Z_1$ - соотношение компонентов смеси, $V_1 : V_2$	$Z_2$ - форма выпускного отверстия	$Z_3$ - площадь выпускного отверстия, $мм^2$
*	+1,215	6,38:1	Прямоугольная	2136
Верхний	+1	4:1	Прямоугольная	1963
Основной	0	1:1	Круглая	1257
Нижний	-1	1:4	Круглая	707
*	-1,215	1:6,38	Круглая	609

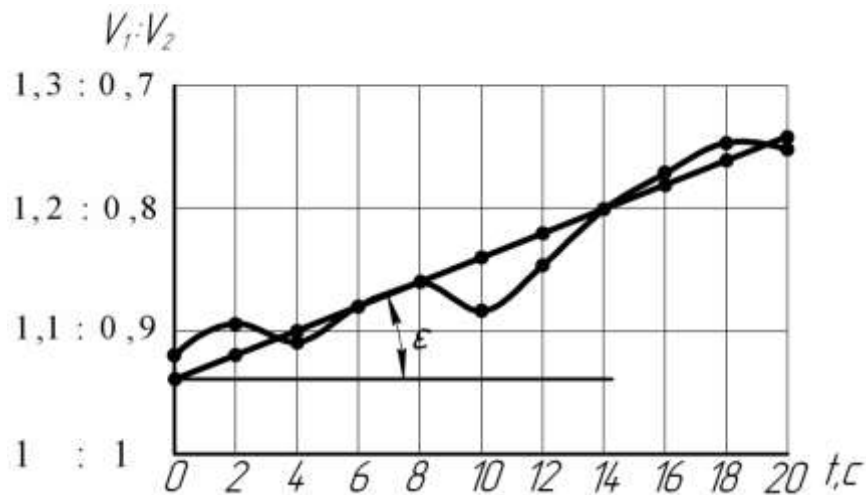


Рисунок 13.6 - График зависимости отношения компонентов смеси от времени истечения

Для каждого опыта по средним из трех повторностей строились графики зависимости изменения отношения компонентов смеси в функции времени (рис.13.6).

Анализ зависимости (рис. 13.6) показывает, что она может быть описана линейной функцией, вида

$$y = a + b \cdot t, \quad (13.5)$$

Угловой коэффициент  $K_p = b = tg \varepsilon$ , характеризующий интенсивность расслоения, был принят за критерий оптимизации  $y$ .

Чем больше величина критерия оптимизации, тем больше угол наклона прямой, характеризующей расслоение смеси при истечении из бункера и тем, следовательно, больше расслоение смеси.

Описание поверхности отклика было выполнено уравнением второго порядка [8], вида

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i z_i + \sum_{1 \leq i < j} b_{ij} z_i z_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} z_i^2, \quad (13.6)$$

где  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  - коэффициенты регрессии;

$b_{ij}$  - эффекты взаимодействий;

$b_{ii}$  - эффекты при квадратичных членах;

$z_i$  - независимые факторы.

Благодаря ортогональности планирования коэффициенты регрессии находятся независимо друг от друга по формуле [8]

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N z_{iu} \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^N z_{iu}^2}, \quad (13.7)$$

где  $i$  - порядковый номер столбца матрицы эксперимента;  $i = 0, 1, 2, \dots, n$ .

$\overline{y}_u$  - значение критерия оптимизации, полученного в  $u$ -м опыте;

$z_{iu}$  - значение фактора  $z_i$  в  $u$ -м опыте;

$N$  - количество опытов (число строк в матрице эксперимента).

Дисперсия коэффициентов регрессии определяется по формуле [8]:

$$S_{\{b_i\}}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{u=1}^N z_{iu}^2}, \quad (13.8)$$

где  $S_y^2$  - дисперсия, характеризующая ошибку опыта, определяемая по формуле [8]

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^k (y_{iu} - \overline{y}_u)^2}{N(k-1)}, \quad (13.9)$$

где  $y_{iu}$  - значение критерия оптимизации в параллельных опытах;

$k$  - количество повторностей опыта.

Дисперсия коэффициента регрессии  $b_0$  определяется по формуле [8]

$$S_{\{b_0\}}^2 = S_{\{b'_0\}}^2 + \left(\overline{z_1}\right)^2 S_{\{b_{11}\}}^2 + \dots + \left(\overline{z_n}\right)^2 S_{\{b_{nm}\}}^2, \quad (13.10)$$

Значимость коэффициентов регрессии рассчитывалась по  $t_{кр}$ -критерию с помощью выражения [41]

$$\Delta b_i = \frac{\pm t_{кр} S_y}{\sqrt{N}}, \quad (13.11)$$

где  $\Delta b_i$  - доверительный интервал;

$t_{кр}$  - табличное значение  $t_{кр}$ -критерия при числе степени свободы, с которым определяется  $S_y^2$ .

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала.

Для проверки гипотезы об адекватности представления результатов полиномом второй степени вычисляется критерий Фишера (F-критерий) по формуле [14]

$$F = \frac{S_{LF}^2}{S_y^2}, \quad (13.12)$$

где  $S_{LF}^2$  - дисперсия неадекватности математической модели.

Дисперсия неадекватности вычисляется по формуле [14]

$$S_{LF}^2 = \frac{k \sum_{u=1}^N (\hat{y}_u - \overline{y}_u)^2}{N - n - 1}, \quad (13.13)$$

где  $\overline{y}_u$  - среднее значение критерия оптимизации в  $u$ -ом опыте при  $k$  повторностях;

$\hat{y}_u$  - значение критерия оптимизации, вычисленное по уравнению регрессии.

Для того. Чтобы принять гипотезу об адекватности, вычисленное значение F-критерия по формуле (3.12) должно быть меньше табличного.

Табличное значение F-критерия выбирается с числом степени свободы числителя  $f_u = N - n - 1$  и с числом степени свободы знаменателя  $f_z = N(k - 1)$ .

13.5. Методика определения зоны максимальной интенсивности расслоения смеси при ее истечении из бункеров

1

Для данного эксперимента использовалась модельная смесь, состоящая из зерен окрашенного и неокрашенного гороха. Часть гороха была окрашена для наглядности и получения смеси, состоящей из компонентов с разными физико-механическими свойствами.

В специальный конический полубункер (рис. 13.5) укладывалось одинаковое количество зерен окрашенного и неокрашенного гороха в шахматном порядке. Через равные промежутки времени открывалась и закрывалась задвижка бункера. Съемка производилась фотоаппаратом Zenit - ТТЛ, фиксируя установившийся режим истечения (рис.3.7)

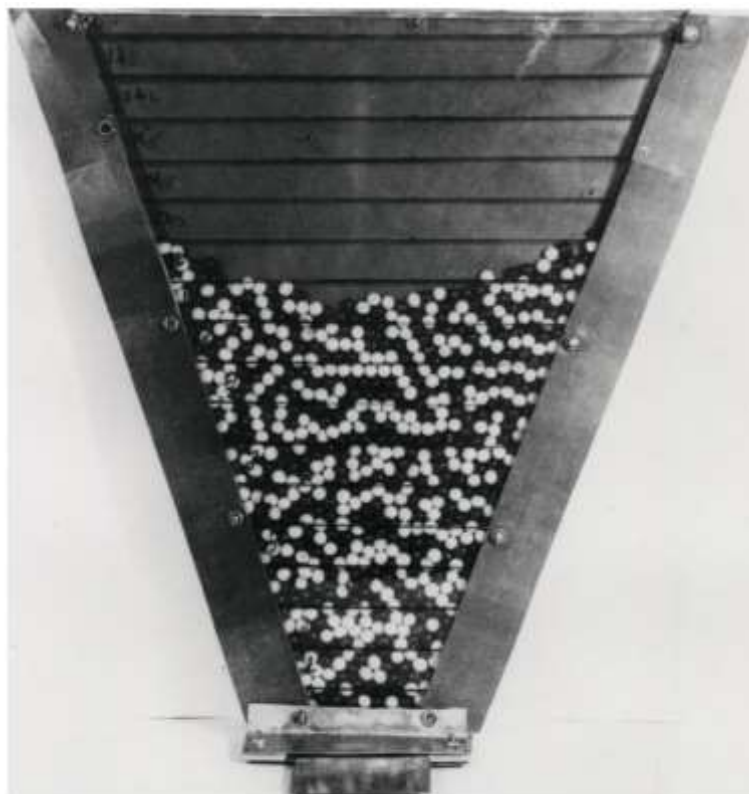


Рисунок 13.7 - Истечение смеси из специального конического полубункера

После каждого промежутка времени (закрытия заслонки) в каждом слое подсчитывалось количество зерен окрашенного и неокрашенного гороха. Таким образом определялось соотношение компонентов смеси в каждом слое через определенные промежутки времени.

Затем для каждого слоя строились графики зависимости изменения соотношения компонентов смеси в функции времени (рис. 3.6).

Угловой коэффициент  $b = tg \varepsilon$ , характеризующий интенсивность расслоения смеси, и был принят за коэффициент  $K_p$  расслоения. Чем больше величина углового коэффициента  $b$ , тем больше интенсивность расслоения смеси, истекающей из бункера.

По полученным коэффициентам  $K_p$  расслоения для каждого слоя строился график зависимости  $K_p$  от высоты расположения слоя над выпускным отверстием бункера.

Целью построения данного графика является определение зоны максимальной интенсивности расслоения смеси, истекающей из бункеров.

### 13.6. Методика экспериментальных исследований эффективности технических средств для снижения расслоения смесей минеральных удобрений

Целью данных исследований является выявление эффективности применения разработанных технических средств для снижения расслоения смесей при истечении из бункеров.

Экспериментальные исследования проводились на экспериментальных установках со сводоразрушающим устройством (рис. 13.2, 13.3) и без него (рис.13.4).

Для исследований использовались смеси минеральных удобрений со стандартной влажностью. Первая состояла из гранул нитроаммофоски и суперфосфата гранулированного, вторая - из гранул нитроаммофоски и мочевины. Последняя имеет свойство при повышенных температурах и влажности воздуха впитывать влагу из воздуха.

Для каждой смеси каждой экспериментальной установки строились графики зависимости изменения соотношения компонентов смеси от времени (рис. 3.6). Для каждого графика подсчитывался угловой коэффициент  $b = tg \varepsilon$ , который и был принят за коэффициент расслоения  $K_p$ .

Затем для каждой смеси сравнивались коэффициенты расслоения  $K_p$  при ее истечении из бункеров со сводоразрушающим устройством и без него.

Применение разработанного технического средства считалось эффективным, если коэффициент расслоения  $K_p$  смеси при ее истечении из бункера со сводоразрушающим устройством оказывался меньше, чем при истечении из бункера без сводоразрушающего устройства. То есть, если снижалось расслоение смесей.

### 13.7. Методика обработки экспериментальных данных

Для проведения экспериментальных исследований по изучению расслоения смеси, истекающей из бункера, диск экспериментальной установки (рис. 3.1) совершал 1 оборот. При этом контейнеры заполнялись смесью, истекающей из бункера-емкости от открытия до закрытия заслонкой выпускного отверстия.

Из 20 контейнеров первые 4 и последние 4 не учитывались при обработке опытных данных, так как для получения правильных результатов необходим установившийся режим истечения сыпучего тела из бункера. Таким образом, для обработки экспериментальных данных использовались контейнеры с 5 по 16.

Затем, смесь из каждого контейнера разделялась с помощью сита на сорго и гранулы пластмассы, так как они имели разный гранулометрический состав.

Это позволило найти путем взвешивания массы компонентов смеси в каждом контейнере:  $m_1$  и  $m_2$ .

Зная плотности компонентов, легко вычислить их объемы  $V_1$ , и  $V_2$  в общем объеме по формуле

$$V = \frac{m}{\gamma}, \quad (13.14)$$

где  $V = V_1 + V_2$  - объем всей смеси в каждом контейнере.

После этого для каждого контейнера по полученным данным вычислялось процентное соотношение компонентов смеси по формуле

$$V_{1(2)\%} = \frac{V_{1(2)}}{V} 100\%, \quad (13.15)$$

По этим данным для каждого контейнера по средним из трех повторностей строился график зависимости изменения соотношения компонентов от времени (рис. 3.6).

С помощью метода наименьших квадратов для каждого графика находились линейные уравнения и коэффициенты расслоения  $K_p$ , используемые далее в работе.

Таким же образом обрабатывались опытные данные при исследовании технических средств для снижения расслоения смесей при истечении из бункеров.

При определении зоны максимальной интенсивности расслоения смеси в начале опыта в каждом слое общее количество зерен складывалось из равного количества окрашенных  $K_{окр}$  и неокрашенных  $K$  зерен гороха. В процессе истечения количество зерен  $K_{окр}$  и  $K$  изменялось вследствие происходящего при этом расслоения смеси.

Процентное соотношение компонентов смеси в каждом слое в определенный промежуток времени вычислялось по формулам:

$$V_{\%окр} = \frac{K_{окр}}{K + K_{окр}} 100\% ; \quad (13.16)$$

$$V_{\%} = \frac{K}{K + K_{окр}} 100\% . \quad (13.17)$$

По этим данным для каждого слоя по средним из трех повторностей строились графики зависимости изменения соотношения компонентов смеси в функции времени (рис. 3.6).

По полученным при помощи метода наименьших квадратов коэффициентам расслоения смеси для каждого слоя строился график зависимости  $K_p$  от высоты расположения слоя над выпускным отверстием.

Проверка адекватности смесей проводилась с помощью критерия Колмогорова А.Н.

Схема применения критерия Колмогорова А.Н. следующая: определялся максимум  $D$  модуля разности между значениями коэффициентов расслоения двух смесей и величина

$$\lambda = D\sqrt{N} \quad (13.18)$$

Затем определялась вероятность  $P(\lambda)$ . Чем больше значение  $P(\lambda)$ , тем лучше согласуются опытные данные двух смесей.

### 13.8. Анализ результатов исследований

#### 13.8.1. Физико-механические свойства гранулированных туков и их смесей

С целью получения качественной смеси компонентов туков была выяснена их совместимость, то есть, их способность к смешиванию (табл. 13.3)

Таблица 13.3 – Допустимость смешивания минеральных удобрений

№ п/п	Удобрение	1	2	3	4
1	Аммиачная селитра	Х	Д	М	М
2	Суперфосфат	Д	Х	М	М
3	Калийная соль	М	М	Х	М
4	Хлористый калий	М	М	М	Х

В таблице: Д – допускается смешивание; М – можно смешивать.

Из таблицы следует, что все исследуемые в работе гранулированные туки могут образовывать туковые смеси, то есть, они совместимы и могут смешиваться.

Гранулометрический состав указанных туков приведен в таблице 13.4

Таблица 13.4 – Гранулометрический состав компонентов смеси

Удобрение	Размер фракций, мм							
	Св.7	7-5	5-3	3-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	До 0,25
Аммиачная селитра	-	0,8	3,7	11,5	50,0	34	-	-
Суперфосфат	6,1	6,2	10,6	8,7	9,8	18,1	21,0	20,5
Калийная соль	15,0	6,0	8,0	6,0	52,0	5,0	5,0	-
Хлористый калий	-	2,2	8,6	9,7	5,5	29,3	25,7	19,0
Горох	-	8,4	86,3	5,3	-	-	-	-
Нитроаммофоска	-	-	3,7	32,4	52,6	11,3	-	-
Мочевина	-	-	22,9	48,7	24,5	3,9	-	-
Сорго	-	-	15,9	66,8	17,3	-	-	-

В результате исследования фрикционных свойств компонентов исследуемых смесей получены следующие данные (таблица 13.6)

Таблица 13.6 – Коэффициенты внутреннего и внешнего трения скольжения туков и их смесей

Удобрения и их смеси	Коэффициенты трения	
	Внутренний коэффициент трения, $tg \psi$	Внешний коэффициент трения, $tg \varphi$ (сталь)
Аммиачная селитра	0,58	0,66
Суперфосфат	0,60	0,55
Калийная соль	0,45	0,42
Хлористый натрий	0,48	0,51
Горох натуральный	0,38	0,61
Горох окрашенный	0,29	0,49
Нитроаммофоска	0,46	0,38
Суперфосфат	0,58	0,53
Мочевина	0,23	0,20
Сорго	0,30	0,28
Пластмасса	0,32	0,30
Аммиачная селитра + Суперфосфат	0,57	0,51
Калийная соль + Хлористый натрий	0,46	0,50
Хлористый калий + Суперфосфат	0,50	0,48
Калийная соль + Суперфосфат	0,49	0,51
Аммиачная селитра +	0,48	0,46



Калийная соль		
Аммиачная селитра + Суперфосфат + Калийная соль	0,61	0,58
Аммиачная селитра + Суперфосфат + Хлористый калий	0,63	0,56
Суперфосфат + Калийная соль + Хлористый калий	0,57	0,54
Нитроаммофоска + Суперфосфат	0,53	0,47
Нитроаммофоска + Мочевина	0,51	0,45
Сорго + Пластмасса (модельная смесь)	0,38	0,36
Горох натуральный + горох окрашенный	0,31	0,58

Из таблицы следует, что значения коэффициентов внутреннего и внешнего трения исследуемых туков одного порядка и варьируют в диапазоне от 0,46 до 0,66 при их влажности от 0,1 до 0,5% (туки предварительно подсушивались). Кроме того, средний диаметр гранул туков был равен в среднем 5 мм. Последний был получен ситовым анализом, то есть, просевом их. Это сделано с целью проведения, так называемого, «чистого» эксперимента, при приготовлении смесей и их расслоении при истечении из емкости разбрасывателя НРУ-0,5. (Производительность НРУ-0,5 – 0,5 м/ч)

### 13.9 Результаты оценки однородности туковых смесей, истекающих из бункера НРУ-0,5 (МВУ-0,5)

Однородность туковой смеси оценивалась по равномерности распределения одного из его компонентов в общем объеме смеси.

В результате экспериментальных исследований были получены данные сегрегации смесей, истекших из бункера НРУ-0,5 (МВУ-0,5) в течение 30 с.

Расчет  $K'_p$  в данной таблице произведен по известным формулам ВНИИТИМЭСХ:

- для 2-х компонентных смесей

$$|K'_p| = \frac{ab' - a'b}{bb'}, \quad (13.19a)$$

где  $(a : b)$  - исходное соотношение компонентов;

$(a' : b')$  - полученное соотношение компонентов;

- для 3-х компонентных смесей

$$|K'_P| = \frac{ab' - a'b}{bb'} - \frac{ac' - a'c + bc' - b'c}{cc'}, \quad (13.206)$$

Таблица 13.5 – Результаты сегрегации некоторых туковых смесей, истекших из емкости разбрасывателя удобрений НРУ-0,5 за 30 с.

Состав тукосмесей	Исходное соотношение компонентов смеси $(a : b)$ , $(a : b : c)$	Конечное соотношение компонентов смеси $(a' : b')$ , $(a' : b' : c')$	Время истечения смеси	Коэффициент расслоения смеси $K'_P$
Хлористый калий + Калийная соль	1 : 1	1 : 1,5	30	0,33
	2 : 1	1 : 1,3		1,23
	3 : 1	2 : 1,7		1,83
Хлористый калий + Селитра	1 : 1	1,5 : 1	30	0,40
Суперфосфат + Калийная соль + Аммиачная селитра	1 : 1 : 1	1,5 : 1 : 1,3	30	0,41
	1 : 3 : 1	1,3 : 2,5 : 1,5		0,71
Суперфосфат + Хлористый калий + Аммиачная селитра	2 : 1 : 1	1,7 : 1,5 : 0,7	30	0,73
Суперфосфат + Аммиачная селитра + Калийная соль	1 : 1 : 1	1 : 1,1 : 0,9	30	0,24
Суперфосфат + Калийная соль	2 : 1	1 : 1,3	30	0,33

где  $(a : b : c)$  - исходное соотношение компонентов смеси;  
 $(a' : b' : c')$  - полученное соотношение компонентов смеси.

Из таблицы следует, что, чем больше соотношение компонентов смеси, тем больше коэффициент ее расслоения. Обусловлено это тем, что в смеси с большим соотношением ее компонентов, больше линий скольжения в емкости и, следовательно, вероятней образование динамических сводов, которые, как уже было обосновано во второй главе, способствуют повышению фрикционной сегрегации туковых смесей.

В связи с тем, что на сегрегацию туковых смесей, компоненты которых имеют разные фрикционные свойства, влияют различные факторы, покажем это влияние в дальнейшем анализе, используя многофакторный эксперимент.

13.10 О факторах, влияющих на расслоение смесей при их истечении из бункеров

По результатам априорного ранжирования факторов расчет коэффициента конкордации по формуле (3.1) показывает, что  $W=0,53$  существенно отличается от 0.

Поэтому между мнениями специалистов имеется достаточная согласованность.

Проверив значимость коэффициента конкордации по критерию Пирсона (3.4), можно с 95%-ной вероятностью утверждать, что согласованность специалистов, оцениваемая коэффициентом конкордации, не является случайной, поскольку

$$\chi_{табл}^2 = 16,919 < \chi_{расч}^2 = 28,62. \quad (13.21)$$

Для наглядности представления результатов априорного ранжирования факторов по данным анкет была построена средняя априорная диаграмма рангов распределения факторов, влияющих на расслоение смеси при истечении из бункеров (рис. 13.9)

На основании априорного исследования были выявлены следующие наиболее значимые факторы:

$Z_8$  - колебания;

$Z_3$  - площадь выпускного отверстия;

$Z_9$  - коэффициент внешнего трения;

$Z_1$  - соотношение компонентов смеси;

$Z_2$  - форма выпускного отверстия.

Производственный опыт показывает, что во время работы разбрасыватели минеральных удобрений испытывают низкочастотные колебания (1,8 - 2,5 Гц), которые не оказывают заметного влияния на расслоение смесей при их истечении из бункеров (по данным экспериментальных исследований ВНИПТИМЭСХ). Поэтому фактор  $Z_8$  в дальнейшем анализе не рассматривался.

Коэффициент внешнего трения  $Z_9$  является случайным, в общем случае, фактором, зависящим от состава смеси (вида используемых удобрений) и соотношения ее компонентов. К тому же в теоретических предпосылках коэффициенты трения учтены. Поэтому при дальнейшем анализе он не учитывался.

### 13.11 Проверка адекватности модельной и реальной смесей

Экспериментальные исследования расслоения смеси, истекающей из бункеров, проводились на экспериментальной установке (см. рис. 3.1).

В качестве модельной смеси использовалась смесь из гранул пластмассы и сорго.

Для обобщения полученных результатов на смеси минеральных удобрений была произведена проверка адекватности экспериментальных исследований на смеси из компонентов гранул пластмассы и семян сорго и смеси, состоящей из гранул мочевины и нитроаммофоски.

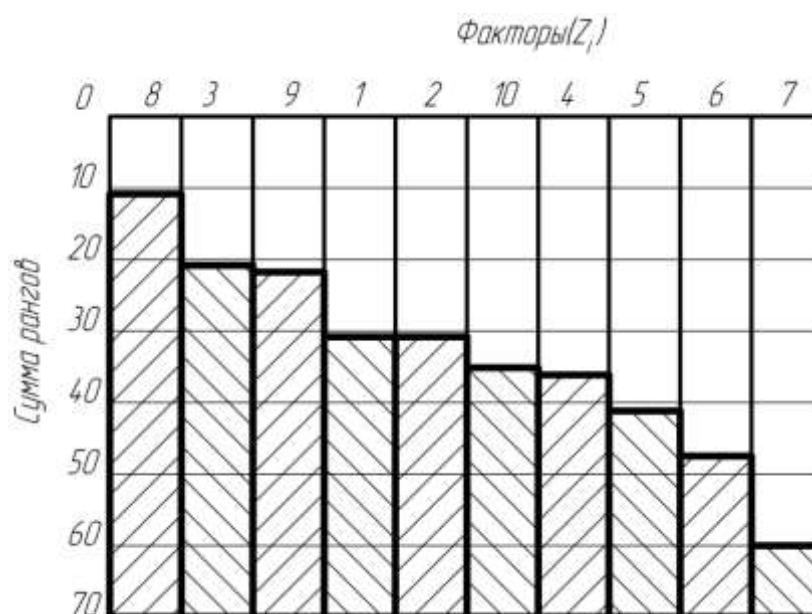


Рисунок 13.9 - Априорная диаграмма рангов

Итак, с помощью экстремального эксперимента в дальнейшем будут исследоваться следующие факторы:

- $Z_3$ - площадь выпускного отверстия;
- $Z_1$ - соотношение компонентов смеси;
- $Z_2$ - форма выпускного отверстия.

Экспериментальные исследования, результаты которых представлены в виде графиков 1 (смесь из гранул сорго и пластмассы) и 2 (смесь из нитроаммофоски и мочевины) на рисунке 4.2 проводились по одной методике в равных условиях (подробно методика проведения экспериментов и обработка опытных данных описаны в главе 3).

Проверка адекватности проводилась с помощью критерия Колмогорова А.Н. По табл. 7.6.1. вероятность  $P(\lambda) = 1,00$ .

Следовательно, смесь из гранул пластмассы и сорго адекватна смеси, состоящей из гранулированных минеральных удобрений.

Таким образом, полученные результаты исследований на смеси из пластмассы и сорго можно использовать применительно к минеральным удобрениям.

Учитывая, что оба графика (рис. 4.2) построены экспериментальным путем, то значения вероятности по критерию Колмогорова А.Н. даются завышенными.

### 13.12 Описание поверхностей откликов функций многофакторного эксперимента

Для выявления степени влияния факторов на расслоение смеси был проведен трехфакторный эксперимент. В экстремальный эксперимент вошли

факторы, полученные в результате проведения априорного ранжирования факторов (площадь и форма выпускного отверстия бункера, соотношение компонентов смеси).

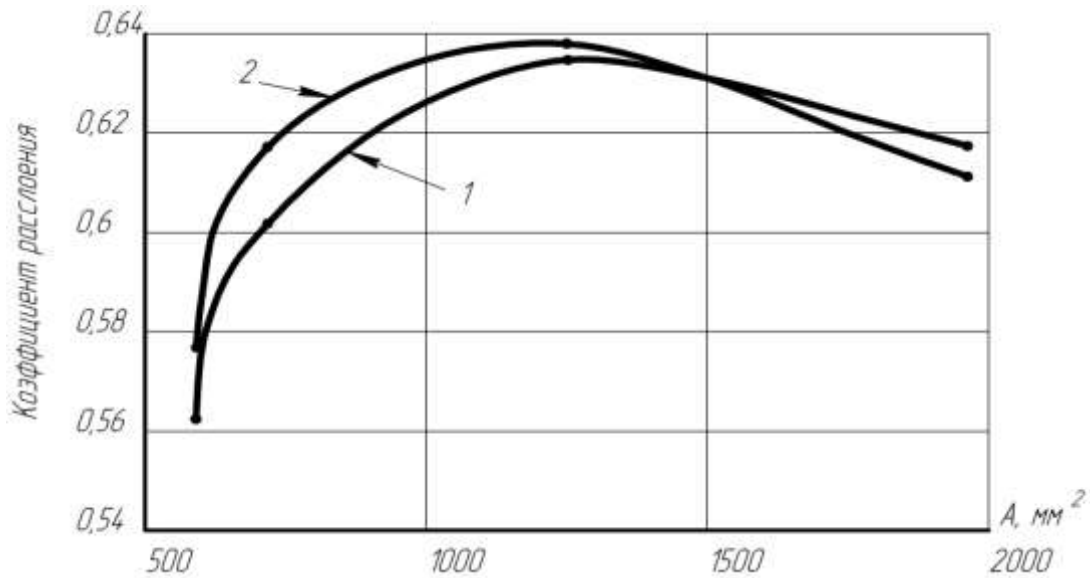


Рисунок 13.7 - Зависимость расслоения смесей от площади выпускного отверстия бункера

Описание поверхности отклика было выполнено уравнением второго порядка вида (3.6) для трех факторов

$$y = b_0 + b_1 z_1 + b_2 z_2 + b_3 z_3 + b_{12} z_1 z_2 + b_{13} z_1 z_3 + b_{23} z_2 z_3 + b_{11} z_1^2 + b_{22} z_2^2 + b_{33} z_3^2 \quad (13.22)$$

После реализации матрицы планирования, представленной в таблице 13.6 были подсчитаны коэффициенты регрессии (13.7) и величины их доверительных интервалов (13.11), которые приведены в таблице 13.6

По найденным коэффициентам регрессии составляем уравнение регрессии второго порядка для описания поверхности отклика [41]

$$y = 0,6012 + 0,654 z_1 + 0,0045 z_2 + 0,0275 z_3 - 0,0039 z_1 z_2 + 0,0750 z_1 z_3 + 0,0246 z_2 z_3 - 0,0783 z_1^2 + 0,458 z_2^2 - 0,0346 z_3^2 \quad (13.23)$$

Адекватность модели второго порядка проверялась с помощью критерия Фишера (3.12) и дала хорошие результаты с 95%-ной вероятностью, так как

$$F_{расч} = 0,12 < F_{табл} = 2,1. \quad (13.24)$$

Следовательно, по критерию Фишера данная модель была принята.

Анализ поверхности отклика проводился с помощью двумерных сечений.

Для этого уравнение (4.4) подверглось каноническому преобразованию [41], которое в стандартной канонической форме имеет вид

$$Y - 0,658 = -0,1822z_1^2 + 0,0575z_2^2 + 0,0575z_3^2. \quad (13.25)$$

Каноническое уравнение (4.6) изучалось с помощью двумерных сечений.

Исследование влияние формы выпускного отверстия и его площади на расслоение смеси выполнялось при  $z_1 = 0$ . Для получения этого сечения подставляем значение  $z_1 = 0$  в уравнение (4.4). В результате имеем

$$y = 0,6012 + 0,0045z_2 + 0,0275z_3 + 0,0246z_2z_3 + 0,458z_2^2 - 0,0346z_3^2. \quad (4.7)$$

Определим координаты центра поверхности дифференцированием уравнения (4.7) и решением системы уравнений

Таблица 13.6 – Матрица ортогонального планирования

Содержание плана	Номер опыта	$Z_0$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$y$
План $2^3$	1	+	+	+	+	0,7385
	2	+	+	+	-	0,4378
	3	+	+	-	+	0,6783
	4	+	+	-	-	0,5066
	5	+	-	+	+	0,4836
	6	+	-	+	-	0,5136
	7	+	-	-	+	0,4385
	8	+	-	-	-	0,5364
«Звездные» точки с $\alpha' = 1,215$	9	+	+1,215	0	0	0,5997
	10	+	-1,215	0	0	0,3308
	11	+	0	+1,215	0	0,6633
	12	+	0	-1,215	0	0,6336
	13	+	0	0	+1,215	0,5276
	14	+	0	0	-1,215	0,5629
Нулевая точка	15	+	0	0	0	0,6336

Оценивая коэффициенты регрессии (табл. 4.6), видно, что все коэффициенты значимы и все они рассматриваются при дальнейшем анализе.

Таблица 13.7 – Значения коэффициентов регрессии и величины их доверительных интервалов

Обозначение	Величина	Доверительный интервал	Обозначение	Величина	Доверительный интервал
$b_0$	0,6012	$\pm 0,0171$	$b_{22}$	0,0458	$\pm 0,0069$
$b_1$	0,0654	$\pm 0,0027$	$b_{33}$	-0,0346	$\pm 0,0069$
$b_2$	0,0045	$\pm 0,0027$	$b_{12}$	-0,0039	$\pm 0,0037$
$b_3$	0,0275	$\pm 0,0027$	$b_{13}$	0,0750	$\pm 0,0037$
$b_{11}$	-0,0783	$\pm 0,0069$	$b_{23}$	0,0246	$\pm 0,0037$

$$\begin{cases} \frac{dy}{dz_2} = 0,0045 + 0,0246z_3 + 0,0916z_2 = 0; \\ \frac{dy}{dz_3} = 0,0275 + 0,0246z_2 - 0,0692z_3 = 0; \\ z_{2S} = -0,1432; \quad z_{3S} = 0,349. \end{cases} \quad (13.26)$$

Подставляя значения  $z_{2S}$  и  $z_{3S}$  в уравнение (13.26), получим значение коэффициента расслоения  $Y_S = 0,597$ .

Для проведения канонического преобразования уравнения (4.7), решим характеристическое уравнение

$$f(B) = \begin{vmatrix} 0,0458 - B & 0,0123 \\ 0,0123 & -0,0346 - B \end{vmatrix} = 0. \quad (13.27)$$

Собственными числами (корнями) данного характеристического уравнения будут:  $B_{22} = 0,0476$ ;  $B_{33} = -0,0364$ .

Само уравнение в канонической форме запишется

$$Y - 0,597 = 0,0476z_2^2 - 0,0364z_3^2. \quad (13.28)$$

Правильность полученных вычислений подтверждается проверкой, то есть, сравнением сумм коэффициентов при квадратичных членах:

$$0,0476 + (-0,0364) = 0,0112$$

$$0,0458 + (-0,0346) = 0,0112.$$

Угол поворота осей координат в точке S найден по формуле

$$\operatorname{tg} 2\alpha_S = \frac{B_{23}}{B_{22} - B_{33}} = \frac{0,0246}{0,0458 + 0,0346} = 0,30597, \quad (13.29)$$

то есть,  $\alpha_S = 8^\circ 30' 22,58''$ .

Следует отметить, что так как угол поворота  $\alpha_S$  - положителен, то оси в центре поворачиваются против часовой стрелки. Подставляя различные значения  $Y$  в уравнение (4.10), получаем уравнения соответствующих контурных линий – гипербол, в совокупности представляющих целое семейство сопряженных гипербол (линий равного значения коэффициента расслоения смеси, истекающей из бункеров) (рис. 4.3).

Из формулы (13.29) видно, что максимальное значение коэффициента расслоения смеси в рассматриваемом сечении поверхности отклика при прочих факторах ( $z_2, z_3$ ), взятых на указанных уровнях, равно 0,597 и имеет место при круглом выпускном отверстии.

Из анализа рисунка 4.3 можно заключить, что оптимальной формой выпускного отверстия является круглая, а увеличение коэффициента расслоения происходит при средних значениях площади выпускного отверстия и, как следствие, его производительности.

Аналогичным способом были построены и оставшиеся два двумерных сечения.

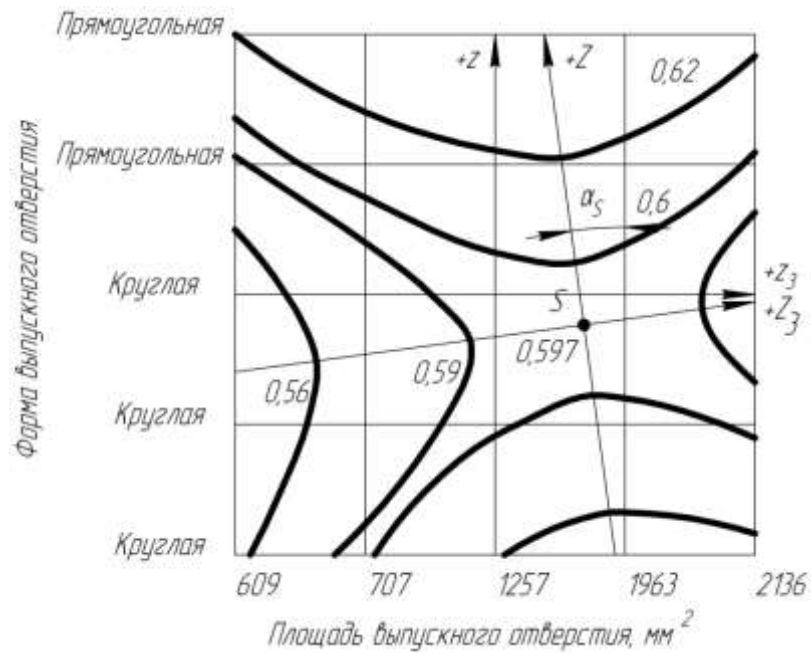


Рисунок 13.8 - Двумерное сечение поверхности отклика при  $z_1 = 0$

С целью оценки влияния факторов соотношения компонентов смеси ( $z_1$ ) и площади выпускного отверстия ( $z_3$ ) на расслоение смеси рассматривалось двумерное сечение поверхности отклика при  $z_2 = 0$ .

Линии равных уровней представляют собой эллипсы (рис.4.4), соответствующие каноническому уравнению

$$Y - 0,667 = -0,0999z_1^2 - 0,0131z_3^2 \quad (13.30)$$

с центром, расположенным вне поля эксперимента ( $z_{1S} = 1,264$ ;  $z_{3S} = 1,767$ ), угол поворота новых осей координат составляет  $\alpha_s = -29^\circ 53' 9,73''$ .

Максимальное значение критерия оптимизации составляет 0,667.

Анализ данного двумерного сечения показывает, что расслоение смеси уменьшается при увеличении содержания компонента в смеси с меньшими размерами частиц и большей их плотностью по сравнению с другим компонентом. Увеличение площади выпускного отверстия и, как следствие, увеличение его производительности, ведет к увеличению расслоения смеси.

Двумерное сечение поверхности отклика, описываемой уравнением (13.30) по факторам (соотношение компонентов смеси ( $z_1$ ) и форма выпускного отверстия ( $z_2$ )), представлено на рисунке 13.9.

После подстановки  $z_3 = 0$  в уравнение (4.4) и преобразований, уравнение регрессии в канонической форме запишется

$$Y - 0,615 = 0,0458z_2^2 - 0,0783z_1^2. \quad (13.31)$$

Линиями равных уровней являются гиперболы, с центром, находящимся в зоне эксперимента

$$z_{1S} = 0,4172 ; z_{2S} = -0,0312.$$



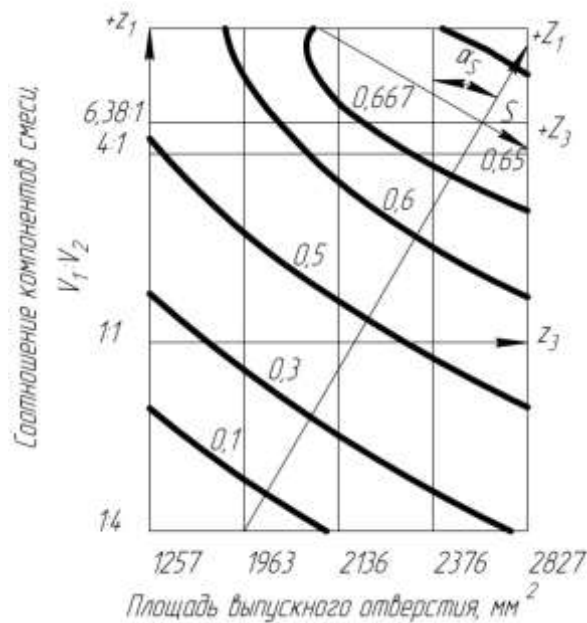


Рисунок 13.9 - Двумерное сечение поверхности отклика при  $z_2 = 0$

Угол поворота новых осей координат  $\alpha_S = 0^\circ 53' 59,97''$ .

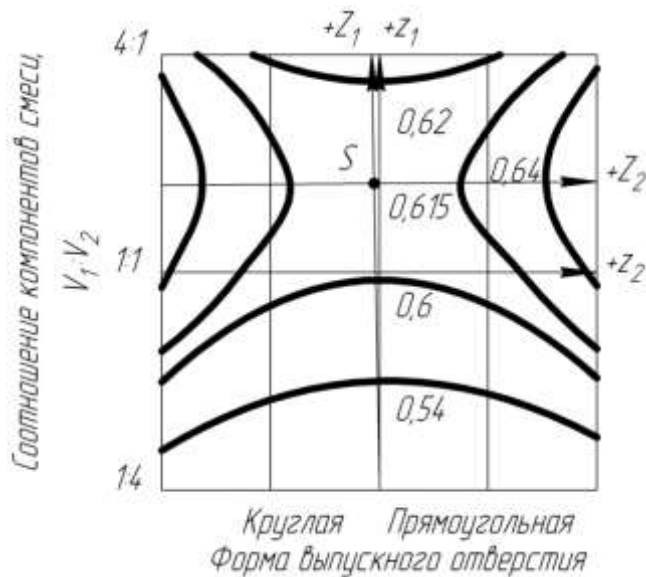


Рисунок 13.10 - Двумерное сечение поверхности отклика при  $z_3 = 0$

На основании полученных результатов экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Круглая форма выпускного отверстия является наиболее выгодной, чем прямоугольная.
2. Увеличение площади выпускного отверстия бункера и, как следствие, увеличение его производительности, ведет к увеличению расслоения смеси.

13.13 Определение зоны максимальной интенсивности расслоения смесей при их истечении из бункеров

Для определения зоны максимальной интенсивности расслоения смеси экспериментальные исследования проводились на специальном коническом полубункере с помощью покадровой съемки.

В результате анализа покадровой съемки были построены 15 графиков зависимости соотношения компонентов от времени истечения (рис. 3.6).

По данным зависимостям найдены коэффициенты расслоения, значения которых приведены в таблице 4.7.

Таблица 13.7-Влияние высоты расположения слоя на коэффициент расслоения

№ слоя	$K_p = b = tg\varepsilon$	№ слоя	$K_p = b = tg\varepsilon$
1	0,5929	9	0,1121
2	0,3202	10	0,0886
3	0,3464	11	0,0500
4	0,4535	12	0,0723
5	0,2441	13	0,0613
6	0,1136	14	0,0311
7	0,0900	15	0,0492
8	0,0941		

Данные табл. 13.7 приведены на рис. 4.6 (кривая 1). Аппроксимация данной зависимости с помощью метода наименьших квадратов показала, что она может быть представлена уравнением вида

$$y = y_0 e^{-\xi x}. \quad (13.32)$$

Выполнив подбор параметров  $y_0$  и  $\xi$ , получим

$$y = 0,4659 e^{-0,1949 x}. \quad (13.33)$$

Графически эта зависимость представлена на рис. 4.6 (кривая 2).

Из рис. 4.6 следует, что интенсивность расслоения смесей имеет наибольшее значение в первых 5 слоях из 15, расположенных ближе к выпускному отверстию, то есть, в нижней 1/3 части бункера.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что чем ближе смесь будет приближаться к выпускному отверстию, тем расслоение ее будет становиться интенсивнее.

Это объясняется тем, что чем ближе частицы расположены к выпускному отверстию, тем интенсивнее происходит взаимодействие между ними.

Кроме того, в нижней 1/3 части бункера увеличивается вероятность образования динамических сводов.

Анализ экспериментальных исследований по определению зоны максимальной интенсивности расслоения смеси показывает, что частицы с меньшим коэффициентом внутреннего трения (окрашенные зерна гороха)

стремятся быстрее достичь выпускного отверстия. ( $tg \psi = 0,38$  - для окрашенного гороха;  $tg \psi = 0,47$  - для неокрашенного гороха)

То есть, при взаимодействии между зернами гороха скорость движения окрашенных зерен гороха оказывается больше скорости зерен неокрашенного гороха с большим коэффициентом внутреннего трения, что вызывает расслоение смеси при ее истечении из бункеров.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Интенсивность расслоения смеси достигает наибольшего значения в нижней 1/3 части бункера (от 0,21 до 0,47).

2. Интенсивность расслоения смеси уменьшается с увеличением высоты расположения слоя над выпускным отверстием бункера.

13.14. Проверка эффективности технических средств, снижающих расслоение смесей

#### 13.14.1. Устройство с активным приводом

Данное техническое решение относится к устройствам для предотвращения образования сводов и перемешивания сыпучих материалов в процессе выгрузки из бункеров сельскохозяйственного назначения и представлено на рис. 13.11.

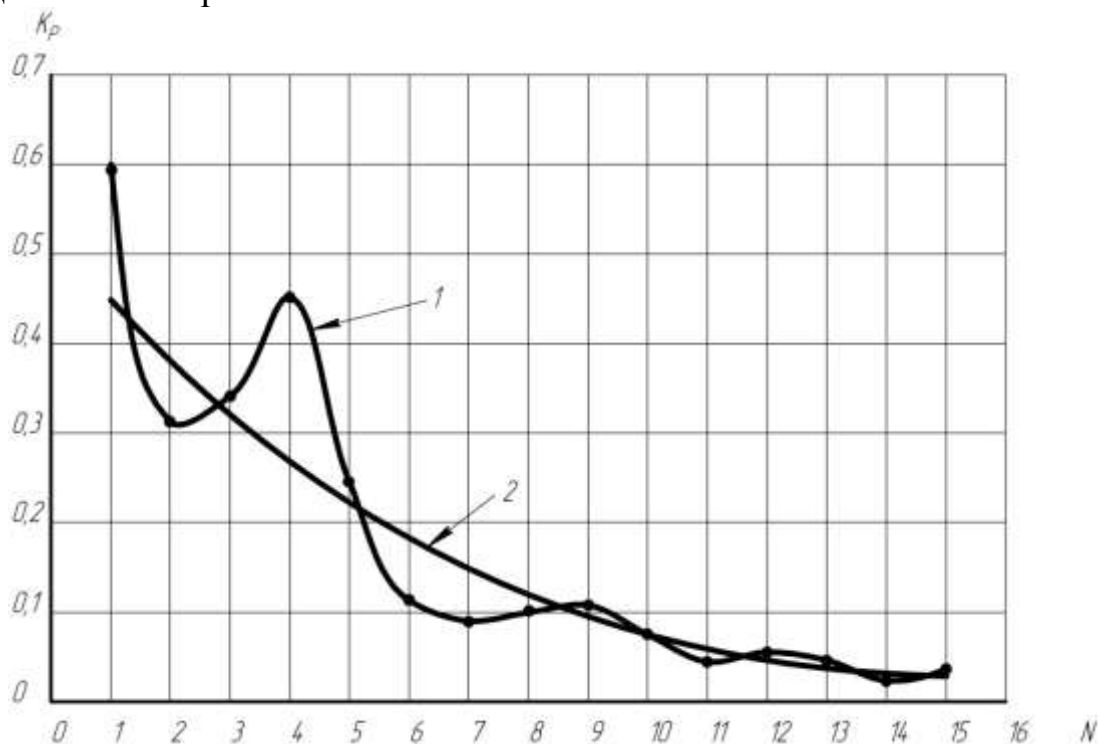


Рисунок 13.11 – График зависимости коэффициента расслоения смеси от высоты расположения слоя над выпускным отверстием

Целью предлагаемого технического решения является интенсификация процесса обрушения сводов и снижение расслоения смесей при выгрузке из бункеров.

Устройство с активным приводом 1 содержит соосно установленный основной вал 2 и дополнительный полый вал 3. К нижнему выступающему концу основного вала 2 жестко прикреплена консольная спираль 4. Спираль 5 дополнительного полого вала 3 верхним концом соединена с валом 3 посредством регулируемой по высоте и фиксируемой втулкой 6 и нижним концом прикреплена к подвижной втулке 7, расположенной над упором 8.

Упор 8, расположенный в нижнем конце дополнительного полого вала 3, удерживает от соскальзывания подвижную втулку 7.

Верхние витки спирали 4 основного вала 2 охватывают нижние витки спирали 5 дополнительного полого вала 3. Навивка спиралей 4 и 5 противоположного направления. Основной вал 2 и дополнительный полый вал 3 имеют раздельный привод и возможность встречного вращения.

Устройство с активным приводом работает следующим образом.

При загрузке бункера 1 под действием силы тяжести сыпучего материала спираль 5 растянется, а спираль 4 сожмется. В результате витки спиралей займут возможное нижнее положение.

С открытием выпускного отверстия включается привод валов 2 и 3. При этом, материал из нижней части бункера 1 выдается на транспортирующий рабочий орган.

Одновременно с этим освобождаются от материала, и соответственно от нагрузки, нижние витки спирали 4. За счет упругости спирали 4 витки, стремясь занять исходное верхнее положение, ударяют по монолиту материала, разрушают свод, освобождая, тем самым, вышележащие витки.

Кроме того, интенсивности разрушению сводов, разрыхлению и перемешиванию компонентов смеси сыпучих материалов способствует вращательное движение основного вала 2 со спиралью 4. Одновременно аналогичный процесс происходит и со спиралью 5.

Встречное вращение валов 2 и 3 со спиральями 4 и 5, способствует еще большему разрыхлению и перемешиванию сыпучего тела, выдаваемого из бункера.

Исследования расслоения смесей проводились на устройствах:

- с активным приводом (рис.13.12)
- без активного привода (рис.13.14)

В таблице 13.7 приведены результаты проведенных экспериментальных исследований расслоения смесей минеральных удобрений.

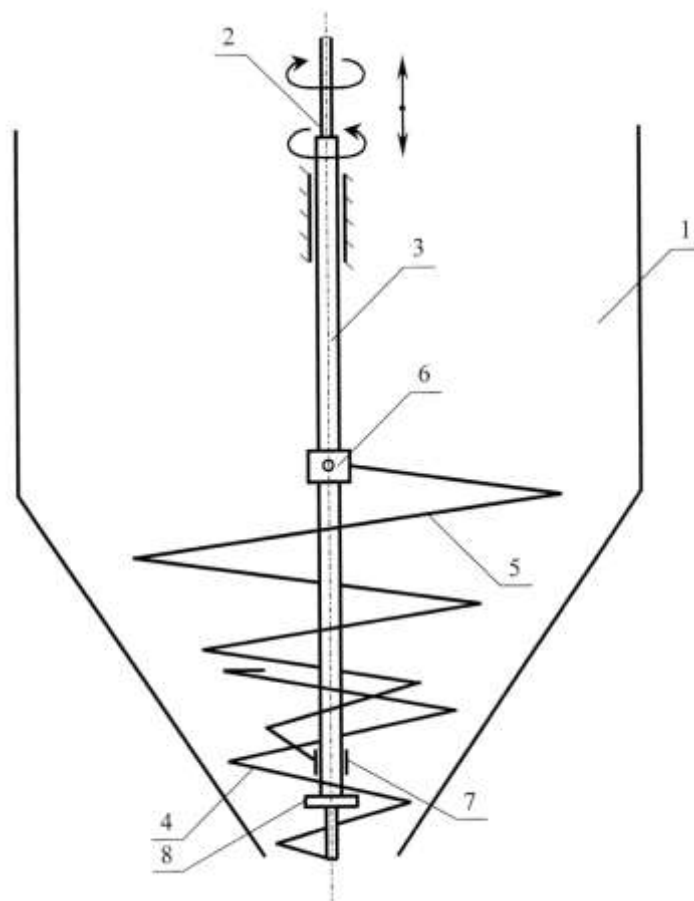


Рисунок 13.12 - Устройство с активным приводом

1- корпус бункера; 2- основной вал; 3- дополнительный полый вал; 4- консольная спираль; 5- спираль вала; 6- неподвижная втулка; 7- подвижная втулка; 8- упор.

Таблица 13.7 - Значения коэффициента  $K_p$  расслоения смесей при истечении из устройств

Вид устройства	Смесь из гранул мочевины и нитроаммофоски	Смесь из нитроаммофоски и суперфосфата гранулированного
Устройство без активного привода	0,399	0,424
Устройство с активным приводом	0,311	0,326
Эффективность устройства с активным приводом, %	22,1	23,5

По данным таблицы 13.7 были построены графики 1 зависимости коэффициента расслоения смесей от времени при истечении из устройства без активного привода и графики 2 - зависимости коэффициента расслоения смесей от времени при истечении из устройства с активным приводом (рис.13.12, 13.14).

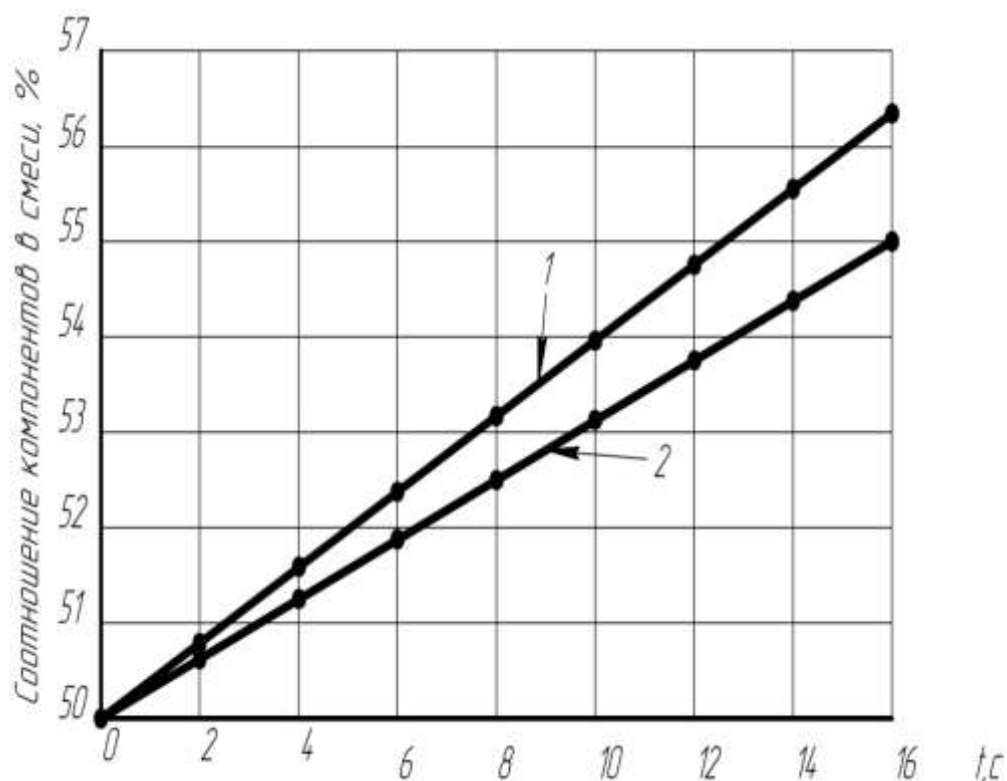


Рисунок 13.13 – График зависимости коэффициента расслоения смеси из гранул мочевины и нитроаммофоски от времени

Проведенный анализ результатов исследований, представленных в таблице 13.7 и на рис. 13.12 и 13.13, показывает, что устройство с активным приводом позволяет уменьшить расслоение смесей минеральных удобрений в среднем на 23%.

#### 13.14.2. Устройство с упругими элементами

Данное техническое решение относится к устройствам для предотвращения образования сводов в процессе выгрузки сыпучих материалов из бункеров сельскохозяйственного назначения. Предлагаемое техническое решение представлено на рисунке 13.14.

Целью предлагаемого технического решения является интенсификация процесса обрушения сводов сыпучего материала в бункерах.

Устройство с упругими элементами (рис. 13.15) содержит сводообрушители, выполненные из упругих консольных пружин 2, жестко прикрепленных одним концом к боковым внутренним поверхностям корпуса бункера 1. Продольные оси пружин 2 перпендикулярны боковым поверхностям корпуса бункера 1. Пружины 2 расположены на разных уровнях со смещением по восходящей винтовой линии. По длине пружин 2 вертикально установлены штыри 3.

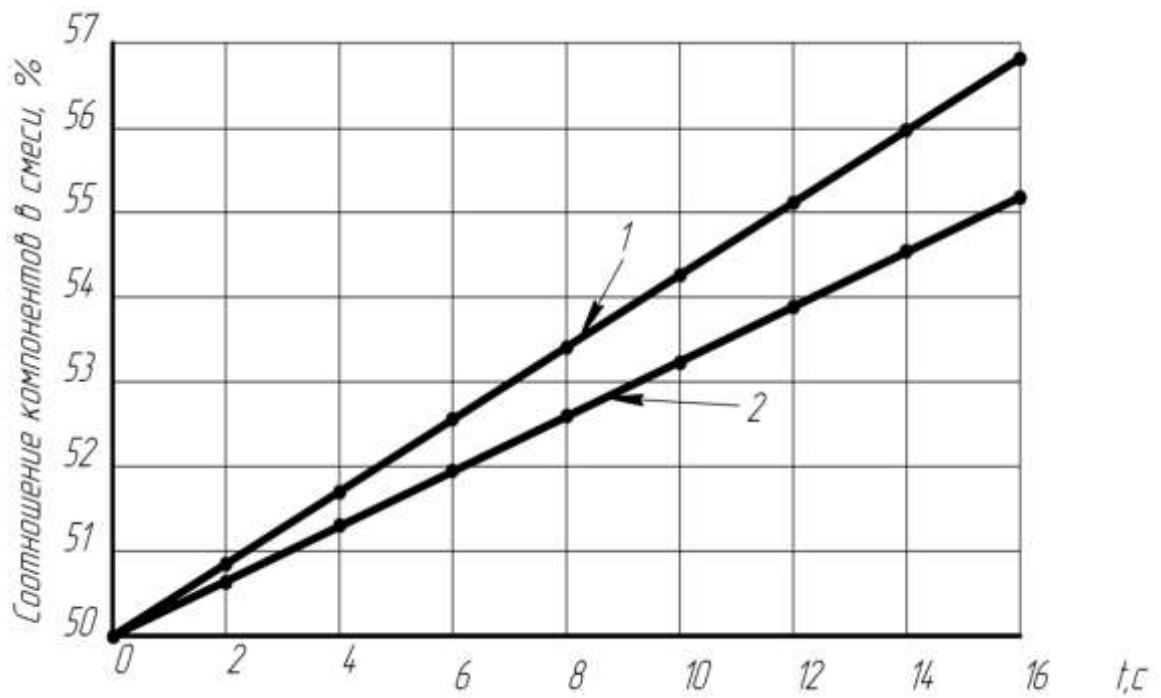


Рисунок 13.14 – График зависимости коэффициента расслоения смеси из нитроаммофоски и суперфосфата гранулированного от времени

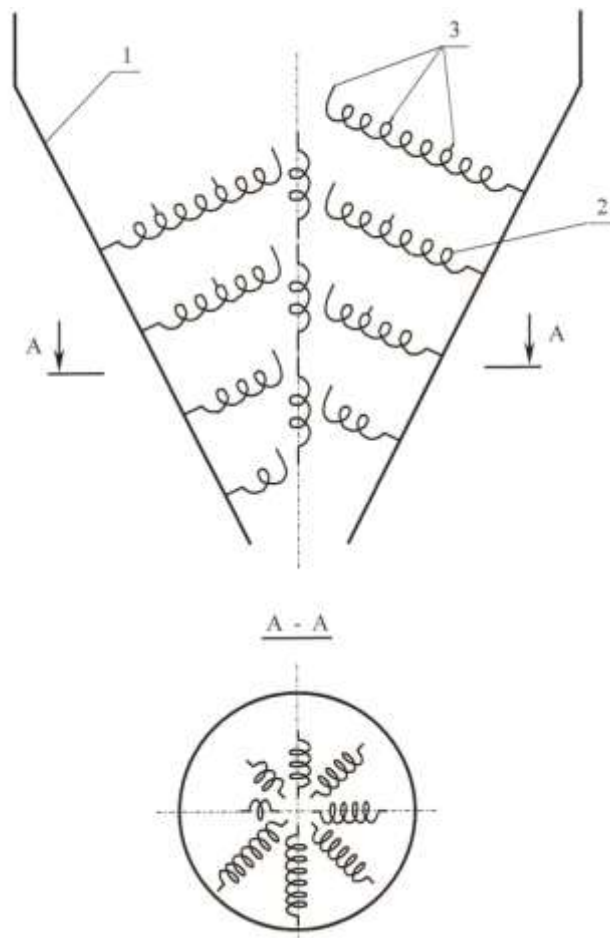


Рисунок 13.15 - Устройство с упругими элементами  
1 – корпус бункера; 2 – консольные пружины; 3 – штыри.

Устройство с упругими элементами работает следующим образом.

При загрузке бункера 1, под действием веса сыпучего материала, консольные пружины 2 изогнутся и займут нижнее возможное положение.

При открытии выпускного отверстия, сыпучий материал из нижней части бункера 1 выдвигается самотеком на транспортирующие рабочие органы. При этом освобождается от нагрузки нижняя пружина 2. За счет упругости пружина 2 будет стремиться занять свое исходное положение и начнет совершать колебательное движение по вертикали.

Штырями 3 пружина 2 будет разрушать свод сыпучего материала, освобождая, тем самым, от нагрузки вышележащую пружину 2.

Далее аналогичный процесс повторяется со следующими вышерасположенными пружинами. Кроме того, смесь сыпучих материалов, встречаясь с нижерасположенными пружинами, активно перемешивается, что уменьшает возможность появления сводов и, следовательно, снижает, тем самым, расслоение смеси при ее истечении из бункеров.

Экспериментальные исследования проводились аналогичным образом на устройствах:

- с упругими элементами (рис. 13.15)
- без упругих элементов (рис. 13.16)

Таблица 13.8 – Значение коэффициента  $K_p$  расслоения смесей при истечении из бункеров

Вид устройства	Смесь из гранул мочевины и нитроаммофоски	Смесь из нитроаммофоски и суперфосфата гранулированного
Устройство без упругих элементов	0,399	0,424
Устройство с упругими элементами	0,286	0,279
Эффективность устройства с упругими элементами, %	28,3	34,2

Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 4.9. По данным табл. 13.8 были построены графики 1 зависимости коэффициента расслоения смесей от времени при истечении из устройства без упругих элементов и графики 2 зависимости коэффициента расслоения смесей от времени при истечении из устройства с упругими элементами (рис. 13.15, 13.16).



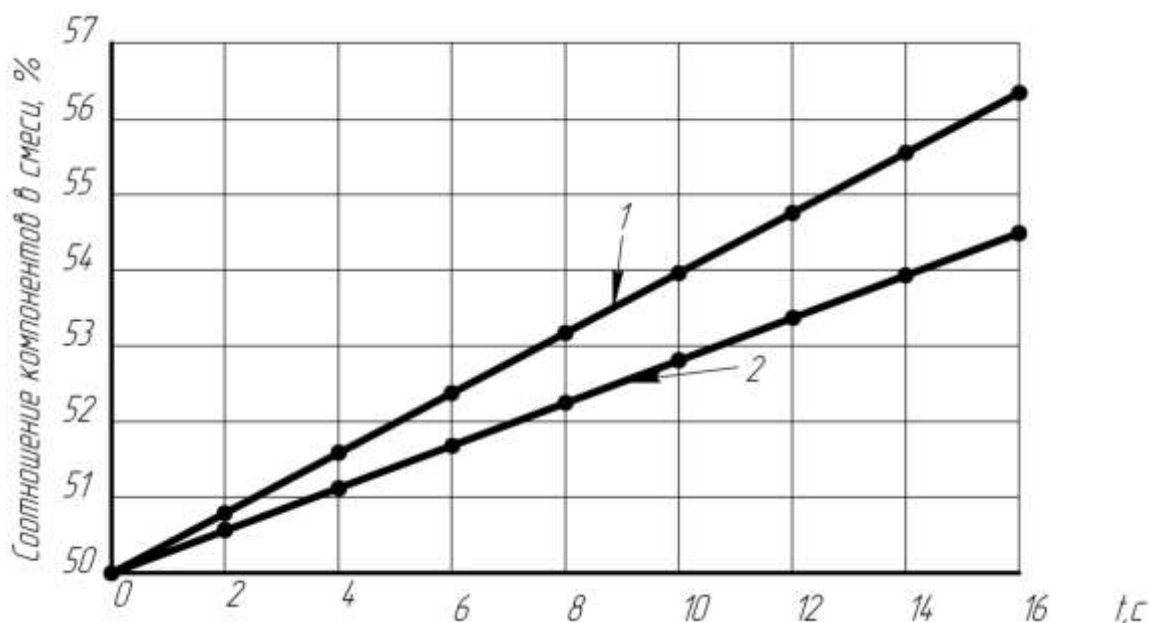


Рисунок 13.16 – График зависимости коэффициента расслоения смеси из гранул мочевины и нитроаммофоски от времени

Анализ результатов, представленных в таблице 4.5 и на рисунках 4.11 и 4.12, показывает, что устройство с упругими элементами позволяет уменьшить расслоение смесей, в среднем, на 31%.

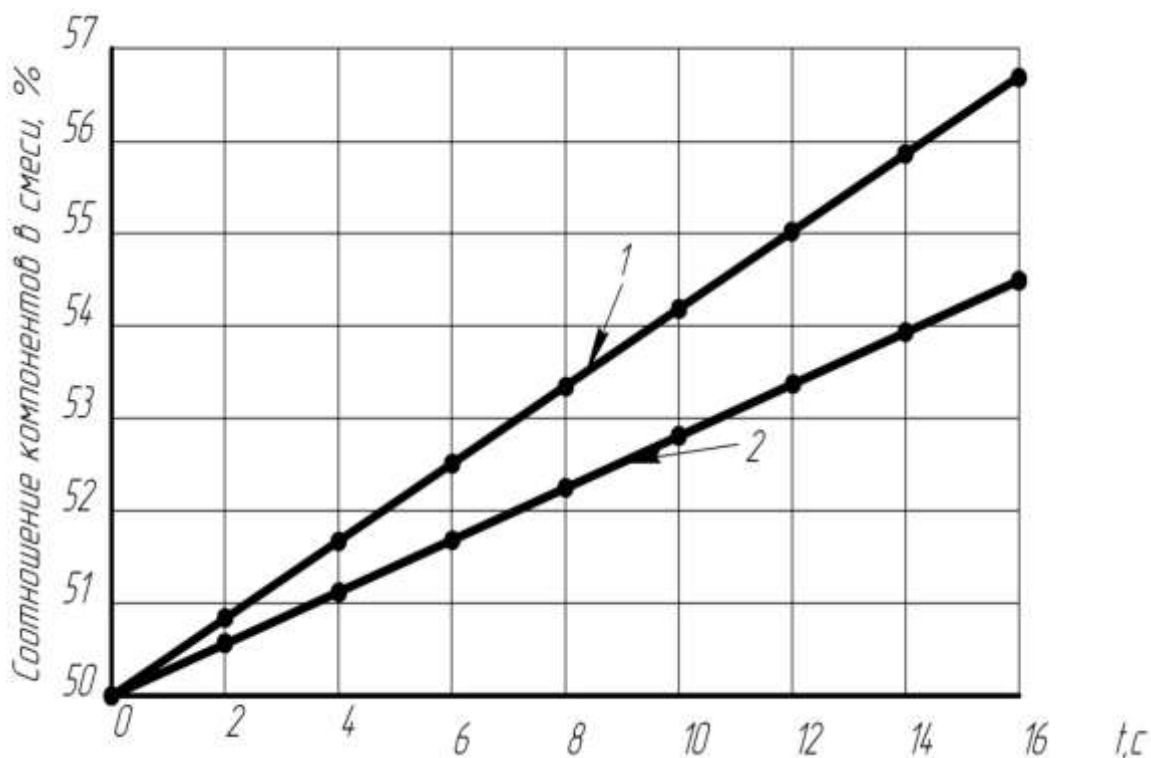


Рисунок 13.17 – График зависимости коэффициента расслоения смеси из нитроаммофоски и суперфосфата гранулированного от времени

1. Наиболее значимыми факторами, влияющими на расслоение смеси, являются: колебания, коэффициенты внутреннего и внешнего трения, соотношение компонентов смеси, площадь и форма выпускного отверстия.
2. Увеличение содержания частиц с меньшими размерами и большей их плотностью по сравнению с другими компонентами увеличивает расслоение смеси.
3. Круглая форма выпускного отверстия является более выгодной, а увеличение площади выпускного отверстия бункера и, как следствие, его производительности ведет к увеличению расслоения смеси.
4. Интенсивность расслоения смеси достигает наибольшего значения в нижней  $1/3$  части бункера (коэффициент расслоения смеси изменяется от 0,21 до 0,47), уменьшаясь с увеличением высоты расположения слоя над выпускным отверстием бункера.
5. Предложенные технические средства позволяют снизить расслоение смесей при истечении из бункеров, в среднем, на 23-31 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Блох Э.Л., Лошинский Л.М., Турин В.Я. Основы линейной алгебры и некоторые ее приложения. – М.: «Статистика», 1974. – 160 с.
2. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: «Статистика», 1974. – 192 с.
3. Голикова Т.И., Микешина Н.Г. Свойства D – оптимальных планов и методы их построения. – В кн.: Новые идеи в планировании эксперимента. – М.: «Наука», 1969. – 21-58 с.
4. Дьяконов В.П., Абраменкова И.В. MathCAD 7.0 в математике, физике и в Internet. – М.: «Нолидж», 1999. – 352 с.
5. Кашин М.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. – М.: «Машиностроение», 1974. – 231 с.
6. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента. – М.: «Металлургия», 1976. – 128 с.
7. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: «Наука», 1965. – 340 с.
8. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: «Машиностроение», 1980. – 304 с.
9. Рузинов Л.П. Статистические методы оптимизации химических процессов. – М.: «Наука», 1972. – 200 с.
10. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математическая статистика. – М.: «Наука», 1965. – 511 с.
11. Klefer J. Optimum designs in regression problems. – Ann. Math. Stat., 1959, v. 15, p. 611-614.
12. Klefer J. Optimum experimental designs. – J. Royal Stat, 1959, v. B21, p. 272-319.
13. Klefer J. Optimum designs in regression problems II. – Ann. Math. Stat., 1961, v. 32, p. 299-325.
14. Адлер, В.А. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / В.А. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 221 с.
15. Адлер, В.А. Введение в планирование эксперимента [Текст] / В.А. Адлер. – М.: Metallurgia, 1999. – 159 с.
16. Алтухов, А. Развитие продовольственного рынка России. Ч.1. [Текст] / А. Алтухов, Г. Маркин, М. Бабков. – М.: АгриПрес, 1999. – 336 с.

17. Василенко, П.М. Культиваторы (конструкция, теория и расчет) [Текст] / П.М. Василенко, П.Т. Бабий. – Киев: АНУСР, 1961. – 239 с.
18. Высоцкий А.А. Динамометрирование сельскохозяйственных машин. [Текст] / А.А. Высоцкий. – М.: Машиностроение, 1968. – 291 с.
19. Гигечкори, Б. С. Приемы формирования современных крон плодовых деревьев. учеб. пособие [Текст] / Б.С. Гигечкори. – Краснодар: 1996. – 136 с.
20. Гильштейн, П.М. Почвообрабатывающие машины и агрегаты [Текст] / П.М. Гильштейн, Д.З. Стародинский, М.З. Циммерман. – М.: Машиностроение, 1969. – 191 с.
21. ГОСТ 20915-75 Сельскохозяйственная техника. Методы определения условий испытаний [Текст]. – 1975 – 06 – 19. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1975. – 118 с.
22. ГОСТ 24057-88 Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно-технологической оценки машинных комплексов, специализированных и универсальных машин на этапе испытаний [Текст]. – 1989 – 01 – 01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1989. – 8с.
23. Гудков, А.Н. Теоретические основы вспашки твердых почв и обоснование конструкции плуга для обработки твердых почв [Текст] / А.Н. Гудков, Н.В. Зотов, А.А.Филатов // Труды Волгоградского СХИ. – Волгоград: СХИ, 1968.
24. Гячев, Л.В. Теория лемешно-отвальной поверхности [Текст] /Л.В. Гячев. – Зерноград,: 1961. – 256 с.
25. Демидко, М.Е. Влияние скорости на сопротивление двугранного клина [Текст] / М.Е. Демидко //Усовершенствование почвообрабатывающих машин: материалы науч. тех. кон. ВИСХОМ, – М.: 1963.
26. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта [Текст] / Б.А. Доспехов. – М.: Колос, 1979 – 200 с.
27. Доспехов, Б. А. Практикум по земледелию [Текст] / Б.А. Доспехов. – М.: Колос, 1977 – 239 с.
28. Желиговский, В. А. Элементы теории почвообрабатывающих машин и механической технологии сельскохозяйственных материалов [Текст] / В.А. Желиговский [Текст] / В.А. Желиговский. – Тбилиси: 1960. – 146 с.
29. Конарев, Ф.М. Ротационные почвообрабатывающие машины [Текст] / Ф.М. Конарев. – М.: Машиностроение, 1983. – 142 с.
30. Касьяненко, А.И. Корневая система подвоев плодовых деревьев [Текст] / А.И. Касьяненко. – Кив : Наукова думка, 1980. – 219 с.
31. Касандрова, О.Н. Обработка результатов наблюдений [Текст] / О.А. Касандрова, В.В. Лебедев. – М.: Наука, 1970. – 224 с.
32. Кириченко, К.С. Почвы Краснодарского края [Текст] / К.С. Кириченко. – Краснодар: Крайгосиздат, 1953. – 240 с.
33. Кленин, Н.И. Сельскохозяйственные машины (Элементы теории рабочих процессов, расчет параметров и режимов работы) [Текст] / Н.И. Кленин [и др.] – М.: Колос, 1970 – 451 с.
34. Корн, Г. Справочник по математике [Текст] / Г. Корн, Т. Корн – М.: Наука, 1972. – 831 с.

35. Кудрявец, Р.П. Продуктивность яблони [Текст] / Р.П. Кудрявец. – М.: Агропромиздат, 1987. – 303 с.
36. Летошнев, М.Н. Сельскохозяйственные машины (Теория, расчет, проектирование и испытание) [Текст] / М.Н. Летошнев. – М.: Сельхозгиз, 1955. – 759 с.
37. Мацепуро, М.Е. Вопросы земледельческой механики [Текст] / под редакцией М.Е. Мацепуро. – т 8. – Минск, 1962. – 465 с.
38. Маслов, Г. Г. Пособие по эксплуатации машинно-тракторного парка [Текст] / Г.Г. Маслов, В.И. Фортуна, В.П.Бражник. – Краснодар: КГАУ, 1996. – 244 с.
39. Манюта, И.В. Некоторые вопросы теории клина. [Текст] / Труды/ Белорусской АСХН. – БССР 1959.
40. Маслов, Г.Г. Система машин для комплексной механизации растениеводства [Текст] / Г.Г. Маслов. – Краснодар: 1987.
41. Маслов, Г. Г. Оптимизация параметров и режимов работы машин методами планирования эксперимента [Текст] / Г.Г. Маслов, О.Н. Дидманидзе, В.В. Цыбулевский. – М.: ООО УМЦ «Триада», 2007. – 291 с.
42. Мельников, С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов [Текст] / С.В. Мельников [и др.] – Л.: Колос, 1980. – 168 с.
43. Пильщиков, Л.М. Практикум по эксплуатации машинотракторного парка [Текст] / Л.М. Пильщиков. – М.: Колос, 1976. – 139 с.
44. Пустыльник, Е.И. Статические методы анализа и обработки наблюдений [Текст] / Е.И. Пустыльник. – М.: Наука, 1968. – 288 с.
45. Синеоков, Г.И. Проектирование почвообрабатывающих машин [Текст] / Г.И. Синеоков. – М.: Машиностроение, 1965. – 310 с.
46. Синеоков, Г.И. Теория и расчет почвообрабатывающих машин [Текст] / Г.И. Синеоков, И.М. Панов. – М.: Машиностроение, 1977. – 326 с.
47. СТО АИСТ 2.2 – 2006. Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки [Текст] – Введ. 2007 – 04 – 15. – Самара: Стандарт организации: ФГНУ «РосНИИИТиМ», 2007. – 12 с.
48. Твердохлебов, С.А. Схема сил при работе долота универсального рабочего органа. [Текст] / А.Н. Медовник, Б.Ф. Тарасенко, С.А. Твердохлебов // Энерго - и ресурсосберегающие технологии и установки. Материалы научной конференции факультета механизации. – Краснодар: КубГАУ, 2008. – С. 46 – 53.
49. Твердохлебов, С.А. Обоснование параметров процесса обработки почвы универсальным рабочим органом по контуру залегания корневой системы плодовых деревьев в междурядьях сада. [Текст] / С.А. Твердохлебов //
50. Трубилин, Е.И. Сельскохозяйственные машины (Конструкция, теория и расчет): учеб. пособие: 2-е издание перераб. и доп. Ч. 1 [Текст] / Е.И. Трубилин, В.А. Абликов, Л.П. Соломатина, А.Н. Лютый. – Краснодар: КубГАУ, 2008. – 200с.

51. Хайн, Х. Д. Рациональное использование машин в сельском хозяйстве [Текст] / Х.Д. Хайн. Пер. с англ. – М.: Колос, 1966 – 269 с.
52. Циммерман, М. З. Рабочие органы почвообрабатывающих машин. [Текст] / М.З. Циммерман. – М.: Машиностроение, 1978 – 295 с.
53. Фере, Н. З. Пособие по эксплуатации машинно-тракторного парка. [Текст] / Н.З. Фере. – М.: Колос, 1978. – 256 с.
54. Якимов, Ю. И. Справочник по эксплуатации машинотракторного парка [Текст] / Ю.И. Якимов, А.В. Осадчий, Г.Г. Маслов, Ш.Н. Богус, В.Т. Ткаченко. – Краснодар: КубГАУ, 2004. – 399 с.
55. Анализ степени покрытия от расстояния. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2004612252. Цыбулевский В.В. 2004.
56. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента // Учеб. пособие для вузов // М.: Радио и связь, 1983 – 248 с. ил.
57. Аскеров А.Д., Велецкий И.Н. Малообъемное опрыскивание гербицидами в саду. Защита растений, 1983, № 12 с. 26.
58. Беляев Е.А., Ченцов В.В. Некоторые особенности развития конструкций ультрамалообъемных опрыскивателей. // Тракторы и сельхозмашины, 1982, № 8, с. 16-19.
59. Борисова С.М. Обоснование технологической схемы, конструктивных и режимных параметров ультрамалообъемного опрыскивателя с эжекционно-щелевыми распылителями. – Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд.- техн. наук, Краснодар, 1997.
60. График зависимости скорости воздушной струи от расстояния до сопла. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2005612534. Цыбулевский В.В. 2005.
61. Графики Вк 3-х факторного. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2004611921. Цыбулевский В.В. 2004.
62. Действительные в нормализованные 3. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2004612244. Цыбулевский В.В. 2004.
63. Диаметр капли по Заутеру. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2004611925. Борисова С.М., Цыбулевский В.В. 2004.
64. Дифференциальное распределение фракционного состава рабочей жидкости. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2005612056 Цыбулевский В.В. 2005.
65. Дунский В.Ф., Никитин Н.В. Метод определения спектра размеров капель при распылении жидкостей. – Инж. физ. журнал, 1967. т. 12, № 2, с. 254-262.
66. Дунский В.Ф. Оседание аэрозоля, вводимого в атмосферу в виде вертикальной турбулентной струи. Л.: Гидрометео. издат., 1968, с. 215-222. (Тр. ГГО, Вып. 37).

67. Зависимость степени покрытия от расстояния. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2004612253. Цыбулевский В.В. 2004.
68. Исходные требования на базовые машинные технологические операции в растениеводстве. М., ФГНУ «Росинформагротех», 2005, с.250.
69. Интегральная кривая распределения фракционного состава рабочей жидкости. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2006610740. Цыбулевский В.В. 2006.
70. Каноническое преобразование Вк-3. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2004611927. Цыбулевский В.В. 2004.
71. Кукта Г.М. Испытания сельскохозяйственных машин. – М.: Машиностроение. 1964. – 281 с.
72. Ластовец А.И. Оценка дисперсности распыленной жидкости. Труды МИХМа, 1950, т. 2 (10).
73. Лепехин Н.С., Цырин А.А. Оценка полидисперсности распыла жидкости. – Техника в сельском хозяйстве. № 1, 1989.
74. Масло И.П., Терехов А.П. Статистический анализ равномерности распределения материалов. // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1981, № 8, с. 50-52.
75. Мельников С.В., Асешкин В.Р., Рощин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. – Л.: Колос, 1972. – 200 с.
76. Мельников С.В. и др. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Колос Ленингр. Отдел., 1980-168 с. 6 ил.
77. Методика проведения полевых опытов и исследований по разработке технологии авиационных работ в сельском хозяйстве и агрооценки сельхозаппаратуры. – М., 1983.
78. Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Материалы VII региональной научно-практической конференции молодых ученых. Краснодар, 8-9 декабря 2005г. – КубГАУ, Краснодар 2005г.
79. Нормализованные в действительные 3. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2004610547. Цыбулевский В.В. 2004.
80. Палапин А.В. Оптимизация параметров и режимов работы ультрамалообъемного вентиляторного опрыскивателя. – Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд.- техн. наук, Краснодар, 2005.
81. План Вк 3-х факторный. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2004611924. Цыбулевский В.В. 2004.
82. Погорелый Л.В. Инженерные методы испытания сельскохозяйственных машин. – Киев, Техника, 1981, с. 171.
83. Распределение фракционного состава рабочей жидкости на объекте покрытия. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2006610739. Цыбулевский В.В. 2006.

84. Совершенствование технологий и технических средств в АПК. Сборник материалов 69-й научно-практической конференции, посвященной 55-летию факультета механизации сельского хозяйства Ставропольского ГАУ. – Ставрополь, 2005, с. 288.

85. Справочник пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. М.: «Издательство Агрорус» 2005, с. 326.

86. Степень покрытия поверхности. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2004611923. Цыбулевский В.В. 2004.



## ПРИЛОЖЕНИЯ

Критические значения t-критерия (Стьюдента)

Число степеней свободы, $f$	Уровень значимости $\alpha$		
	0,1	0,05	0,01
1	6,31	12,70	63,66
2	2,92	4,30	9,93
3	2,36	3,18	5,84
4	2,13	2,78	4,60
5	2,02	2,57	4,03
6	1,94	2,45	3,71
7	1,90	2,37	3,50
8	1,85	2,31	3,36
9	1,83	2,26	3,25
10	1,81	2,23	3,17
11	1,80	2,20	3,11
12	1,78	2,18	3,06
13	1,77	2,16	3,01
14	1,76	2,15	2,98
15	1,75	2,13	2,96

Значения  $F$ -критерия (Фишера) для уровня 0,05

Число степеней свободы в знаменателе ( $f_1$ )	Число степеней свободы в числителе ( $f_2$ )							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	161	200	216	225	230	234	237	239
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,36	19,37
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,88	8,84
4	7,71	6,59	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15
7	5,58	4,74	4,35	4,12	3,98	3,87	3,79	3,73
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,70	2,64
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,52	2,45
30	4,16	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,34	2,27

Значения  $F$ -критерия (Фишера) для уровня 0,05

Число степеней свободы в знаменателе ( $f_1$ )	Число степеней свободы в числителе ( $f_2$ )							
	9	10	11	12	14	16	20	24
1	241	242	243	244	245	246	248	249
2	19,38	19,39	19,40	19,41	19,42	19,43	19,44	19,45
3	8,81	8,87	8,76	8,74	8,81	8,69	8,66	8,64
4	6,00	5,96	5,93	5,91	5,87	5,84	5,80	5,77
5	4,78	4,74	4,70	4,68	4,64	4,60	4,56	4,53
6	4,10	4,06	4,03	4,00	3,96	3,92	3,87	3,84
7	3,68	3,63	3,60	3,57	3,52	3,49	3,44	3,41
8	3,39	3,34	3,31	3,28	3,23	3,20	3,15	3,12
9	3,18	3,13	3,10	3,07	3,02	2,98	2,93	2,90
10	3,02	2,97	2,94	2,91	2,86	2,82	2,77	2,74
15	2,59	2,55	2,51	2,48	2,43	2,39	2,33	2,29
20	2,40	2,35	2,31	2,29	2,23	2,18	2,12	2,06
30	2,21	2,16	2,12	2,09	2,04	1,99	1,93	1,89

## РЕФЕРАТЫ

**Программа «Нормализованные в действительные 2»**

Программа «Нормализованные в действительные 2» (перевод коэффициентов уравнения регрессии из нормализованных в действительные при планировании 2-х факторного эксперимента) разработана для проведения вычислений с целью перевода коэффициентов уравнения регрессии из нормализованных в действительные для дальнейшего пользования этим уравнением, подставляя истинные значения исследуемых параметров.

**Программа «Нормализованные в действительные 3»**

Программа «Нормализованные в действительные 3» (Перевод коэффициентов уравнения регрессии из нормализованных в действительные при планировании 3-х факторного эксперимента) разработана для проведения вычислений с целью перевода коэффициентов уравнения регрессии из нормализованных в действительные для дальнейшего пользования этим уравнением, подставляя истинные значения исследуемых параметров. Программа «Действительные в нормализованные 3»

Программа предназначена для перевода действительных коэффициентов исследуемой модели (трех факторная) в нормализованные для дальнейшего исследования данной модели.

#### Программа «Нормализованные в действительные 4»

Программа «Нормализованные в действительные 4» (перевод коэффициентов уравнения регрессии из нормализованных в действительные при планировании 4-х факторного эксперимента) разработана для проведения вычислений с целью перевода коэффициентов уравнения регрессии из нормализованных в действительные для дальнейшего пользования этим уравнением, подставляя истинные значения исследуемых параметров.

#### Программа «Действительные в нормализованные 2»

Программа предназначена для перевода действительных коэффициентов исследуемой модели (двух факторная) в нормализованные для дальнейшего исследования данной модели:

- 1-проверки коэффициентов по t-критерию (критерий Стьюдента);
- 2-проверки гипотезы об адекватности модели по F- критерию (критерий Фишера)

#### Программа «Действительные в нормализованные 4»

Программа предназначена для перевода действительных коэффициентов исследуемой модели (четырёх факторная) в нормализованные для дальнейшего исследования данной модели:

#### **Программа «План Вк 2-х факторный»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели (двух факторная) по симметричному композиционному плану  $V_k$  второго порядка звездные плечи, которого равны  $\alpha=1.0$

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

#### **Программа «ЦКРУП 2-х факторный»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели (двухфакторная) по центральному композиционному ротатабельному униформ плану второго порядка звездные плечи, которого равны  $\alpha=1.414$ .

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

### **Программа «Графики $V_k$ 2-х факторного»**

Программа предназначена для построения графиков исследуемой модели (двух факторной) по симметричному композиционному плану  $V_k$  второго порядка звездные плечи, которого равны  $\alpha=1.0$  в действительных (истинных) значениях, задаваясь нормализованными (мнимыми) коэффициентами уравнения, значениями центра плана исследуемых параметров и их интервала варьирования.

### **Программа «Каноническое преобразование $V_k$ -2»**

Программа предназначена для канонического (стандартного) преобразования симметричного композиционного 2-х факторного плана  $V_k$  второго порядка, которая значительно облегчает геометрический анализ исследуемой модели.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- находит новый центр начала координат при этом в модели исчезают линейные члены  $\sum b_i x_i$ ;
- определяет угол поворота координатных осей при этом в модели исчезают члены  $\sum b_{ij} x_i x_j$ ;
- строит поверхности отклика исследуемой модели.

### **Программа «МНК 2-х факторный (действительные значения факторов)»**

Программа предназначена для нахождения действительных коэффициентов исследуемой модели (двухфакторная) второго порядка методом МНК, факторы которой задаются в действительных (истинных) значениях.

### **Программа «Переход МНК-2 (действительные) - план $V_k$ 2-х факторный»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели (двухфакторная) по симметричному композиционному плану типа  $V_k$  второго порядка звездные плечи которого, равны  $\alpha=\pm 1$ , предварительно получив их по методу МНК в действительном виде.

Получаем уравнение, где коэффициенты исследуемой модели в нормализованном виде:

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

### **Программы «Сплайн функции заданной дискретно»**

Программа «Сплайн функции заданной дискретно» (Нахождение кубической сплайновой аппроксимацией промежуточных значений функции,

заданной дискретно) для проведения вычислений с целью нахождения промежуточных значений функции и для дальнейшего пользования этой функцией.

### **Программы «ЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИЯ»**

Программа «ЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИЯ» (Реализация линейной регрессии общего вида для обработки данных полевых испытаний сельскохозяйственных агрегатов) разработана для проведения вычислений с целью нахождения коэффициентов уравнения регрессии и для дальнейшего пользования этим уравнением, проводится оценка уравнения по критерию Кохрена.

#### **Программа «Функция желательности для односторонних ограничений»**

Программа предназначена для определения функции желательности для односторонних ограничений при решении задач с несколькими зависимыми переменными. Использование функции желательности в качестве параметра оптимизации заключается в том, что значение каждого из параметров оптимизации, которых в задаче может быть сколь угодно много, переводятся в соответствующие желательности ( $d_i$ ), после чего формируется так называемая обобщенная функции желательности ( $D$ ), представляющая собой среднее геометрическое желательностей отдельных параметров оптимизации по формуле:

$$D = \sqrt[q]{d_1 d_2 \dots d_q},$$

где  $q$  – число изучаемых параметров оптимизации.

#### **Программа «Функция желательности для двусторонних ограничений»**

Программа предназначена для определения функции желательности для двусторонних ограничений при решении задач с несколькими зависимыми переменными. Использование функции желательности в качестве параметра оптимизации заключается в том, что значение каждого из параметров оптимизации, которых в задаче может быть сколь угодно много, переводятся в соответствующие желательности ( $d_i$ ), после чего формируется так называемая обобщенная функции желательности ( $D$ ), представляющая собой среднее геометрическое желательностей отдельных параметров оптимизации по формуле:

$$D = \sqrt[q]{d_1 d_2 \dots d_q},$$

где  $q$  – число изучаемых параметров оптимизации.

### **Программа «Переход МНК-2 (действительные) – план ЦКРУП 2-х факторный»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели (двухфакторная) по центральному композиционному ротатабельному униформ плану второго порядка звездные плечи которого, равны  $\alpha = \pm 1,414$ , предварительно получив их по методу МНК в действительном виде.

Получаем уравнение, где коэффициенты исследуемой модели в нормализованном виде:

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

### **Программа «План Вк 3-х факторный»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели (трех факторная) по симметричному композиционному плану  $V_k$  второго порядка звездные плечи, которого равны  $\alpha = 1,0$

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

### **Программа «ЦКРУП 3-х факторный»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели (трехфакторная) по центральному композиционному ротатабельному униформ плану второго порядка звездные плечи, которого равны  $\alpha = 1.682$

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

### **Программа «Графики Вк 3-х факторного»**

Программа предназначена для построения графиков исследуемой модели (трех факторной) по симметричному композиционному плану  $V_k$  второго порядка звездные плечи, которого равны  $\alpha = 1.0$  в действительных (истинных) значениях, задаваясь нормализованными (мнимыми)

коэффициентами уравнения, значениями центра плана исследуемых параметров и их интервала варьирования.

### **Программа «Каноническое преобразование $V_k-3$ »**

Программа предназначена для канонического (стандартного) преобразования симметричного композиционного 3-х факторного плана  $V_k$  второго порядка, которая значительно облегчает геометрический анализ исследуемой модели.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- находит новый центр начала координат при этом в модели исчезают линейные члены  $\sum b_i x_i$ ;
- определяет угол поворота координатных осей при этом в модели исчезают члены  $\sum b_{ij} x_i x_j$ ;
- строит поверхности отклика исследуемой модели.

### **Программа «МНК 3-х факторный (действительные значения факторов)»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели ( трехфакторная ) второго порядка методом МНК, факторы которой задаются в действительных (истинных) значениях.

### **Программа «Переход МНК-3 (действительные) - план $V_k$ 3-х факторный»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели ( трехфакторная ) по симметричному композиционному плану типа  $V_k$  второго порядка звездные плечи которого, равны  $\alpha=\pm 1$ , предварительно получив их по методу МНК в действительном виде.

Получаем уравнение, где коэффициенты исследуемой модели в нормализованном виде:

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

### **Программа «Переход МНК-3 (действительные) –**

#### **план ЦКРУП 3-х факторный»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели ( трехфакторная ) по центральному композиционному ротатабельному униформ плану второго порядка звездные плечи которого, равны  $\alpha=\pm 1,682$ , предварительно получив их по методу МНК в действительном виде.

Получаем уравнение, где коэффициенты исследуемой модели в



нормализованном виде.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

### **Программа «План Вк 4-х факторный»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели ( четырехфакторная ) по симметричному композиционному плану типа Вк второго порядка звездные плечи которого, приняты  $\alpha=\pm 1$ :

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

### **Программа «ЦКРУП 4-х факторный»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели ( четырехфакторная ) по центральному композиционному ротатабельному униформ плану второго порядка звездные плечи, которого равны  $\alpha=2$ .

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

### **Программа «Переход МНК-4 (действительные) - план Вк 4-х факторный»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели ( четырехфакторная ) по симметричному композиционному плану типа Вк второго порядка звездные плечи которого, равны  $\alpha=\pm 1$ , предварительно получив их по методу МНК в действительном виде.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

## **Программа «Переход МНК-4 (действительные) – план ЦКРУП 4-х факторный»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели ( четырехфакторная ) по центральному композиционному ротатабельному униформ плану второго порядка звездные плечи которого, равны  $\alpha = \pm 2$ , предварительно получив их по методу МНК в действительном виде.

Получаем уравнение, где коэффициенты исследуемой модели в нормализованном виде.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

## **Программа «МНК 4-х факторный (действительные значения факторов)»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели ( четырехфакторная ) второго порядка методом МНК, факторы которой задаются в действительных (истинных) значениях.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели в действительных значениях факторов.

## **Программа «Каноническое преобразование ЦКРУП 4-х факторного»**

Программа предназначена для канонического (стандартного) преобразования 4-х факторного центрального композиционного ротатабельного униформ плана второго порядка, которая значительно облегчает геометрический анализ исследуемой модели.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- находит новый центр начала координат при этом в модели исчезают линейные члены  $\sum b_i x_i$ ;
- определяет угол поворота координатных осей при этом в модели исчезают члены  $\sum b_{ij} x_i x_j$ ;
- строит поверхности отклика исследуемой модели.

## **Программа «Графики ЦКРУП 4-х факторного»**

Программа предназначена для построения графиков исследуемой модели (четырёх факторной) по центральному композиционному ротатабельному униформ плану второго порядка звездные плечи, которого равны  $\alpha=2.0$  в действительных (истинных) значениях, задаваясь нормализованными (мнимыми) коэффициентами уравнения, значениями центра плана исследуемых параметров и их интервала варьирования.

### **Программа «Симметричный композиционный ортогональный 2-х факторный план»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели (двух факторная) по симметричному композиционному ортогональному 2-х факторному плану второго порядка звездные плечи, которого равны  $\alpha=1,0$  и один опыт в центре плана.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

### **Программа «Симметричный композиционный ортогональный 3-х факторный план»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели (трехфакторная) по симметричному композиционному ортогональному 3-х факторному плану второго порядка звездные плечи, которого равны  $\alpha=1,215$  и один опыт в центре плана.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

### **Программа «Симметричный композиционный ортогональный 4-х факторный план»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели (четырёхфакторная) по симметричному композиционному ортогональному 4-х факторному плану второго порядка

звездные плечи, которого равны  $\alpha=1,414$  и один опыт в центре плана.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

#### **Программа «Переход МНК-4 (действительные) - план симметричный композиционный ортогональный 4-х факторный»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели ( четырехфакторная ) по симметричному композиционному ортогональному плану второго порядка звездные плечи которого, равны  $\alpha=\pm 1,414$  и один опыт в центре плана, предварительно получив их по методу МНК в действительном виде.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

#### **Программа «Переход МНК-3 (действительные) - план симметричный композиционный ортогональный 3-х факторный»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели ( трехфакторная ) по симметричному композиционному ортогональному плану второго порядка звездные плечи которого, равны  $\alpha=\pm 1,215$  и один опыт в центре плана, предварительно получив их по методу МНК в действительном виде.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

#### **Программа «Переход МНК-2 (действительные) - план симметричный композиционный ортогональный 2-х факторный»**

Программа предназначена для нахождения коэффициентов исследуемой модели ( двухфакторная ) по симметричному композиционному ортогональному плану второго порядка звездные плечи которого, равны  $\alpha=\pm 1,0$  и один опыт в центре плана, предварительно получив их по методу МНК в действительном виде.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет коэффициентов исследуемой модели;
- проверку коэффициентов исследуемой модели на значимость;
- проверку адекватности полученной модели.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Зависимости производительности пневматического щелевого распылителя  
от щели питательной трубки, ширины и высоты  
воздушного сопла

Листинг программы

"План Вк 3-х факторный"

"Производительность"

ko :- 14    n :- ko - 1    n0 :- 6    fl :- n0 - 1    fl = 5

zp :- 1    n = 13    i :- 0.. n

Исходные данные

x1 :-	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ zp \\ -zp \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	x2 :-	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ zp \\ -zp \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	x3 :-	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ zp \\ zp \\ -zp \end{bmatrix}$	yt :-	$\begin{bmatrix} 12.1 \\ 15.2 \\ 26.8 \\ 33.5 \\ 13.5 \\ 16.2 \\ 30.6 \\ 35.8 \\ 18.5 \\ 26.3 \\ 16.1 \\ 29.7 \\ 14.1 \\ 15.6 \end{bmatrix}$	$y_i := \frac{3000}{yt_i} \quad y =$	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td></td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>247.93</td></tr> <tr><td>1</td><td>197.37</td></tr> <tr><td>2</td><td>111.94</td></tr> <tr><td>3</td><td>89.55</td></tr> <tr><td>4</td><td>222.22</td></tr> <tr><td>5</td><td>185.19</td></tr> <tr><td>6</td><td>98.04</td></tr> <tr><td>7</td><td>83.8</td></tr> <tr><td>8</td><td>162.16</td></tr> <tr><td>9</td><td>114.07</td></tr> <tr><td>10</td><td>186.34</td></tr> <tr><td>11</td><td>101.01</td></tr> <tr><td>12</td><td>212.77</td></tr> <tr><td>13</td><td>192.31</td></tr> </table>		0	0	247.93	1	197.37	2	111.94	3	89.55	4	222.22	5	185.19	6	98.04	7	83.8	8	162.16	9	114.07	10	186.34	11	101.01	12	212.77	13	192.31
	0																																						
0	247.93																																						
1	197.37																																						
2	111.94																																						
3	89.55																																						
4	222.22																																						
5	185.19																																						
6	98.04																																						
7	83.8																																						
8	162.16																																						
9	114.07																																						
10	186.34																																						
11	101.01																																						
12	212.77																																						
13	192.31																																						

zy :-  $\sum y$     zx1y :- x1·y    zx2y :- x2·y    zx3y :- x3·y

zy =  $2.2 \cdot 10^3$     zx1y = 172.32    zx2y = 554.7    zx3y = 78.01

zx1x2y :-

```

s ← 0
j ← 0
while n ≥ j
  s ← s + x1j·x2j·yj
  j ← j + 1
s
    
```

zx1x2y = 50.97

zx1x3y :-

```

s ← 0
j ← 0
while n ≥ j
  s ← s + x1j·x3j·yj
  j ← j + 1
s
    
```

zx1x3y = 21.68

zx2x3y :-

```

s ← 0
j ← 0
while n ≥ j
  s ← s + x2j·x3j·yj
  j ← j + 1
s
    
```

zx1x1y :-

```

s ← 0
j ← 0
while n ≥ j
  s ← s + x1j·x1j·yj
  j ← j + 1
s
    
```

$$zx2x3y := \left| \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 0 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + x2_j \cdot x3_j \cdot y_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array} \right.$$

$$zx2x3y = 18.2405$$

$$zx1x1y := \left| \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 0 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + x1_j \cdot x1_j \cdot y_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array} \right.$$

$$zx1x1y = 1512.271$$

$$zx2x2y := \left| \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 0 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + x2_j \cdot x2_j \cdot y_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array} \right.$$

$$zx2x2y = 1523.3859$$

$$zx3x3y := \left| \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 0 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + x3_j \cdot x3_j \cdot y_j \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{array} \right.$$

$$zx3x3y = 1641.114$$

$$zxxiy := zx1x1y + zx2x2y + zx3x3y \quad zxxiy = 4676.7708$$

$$c1 := 0.40625$$

$$c2 := 0.15625$$

$$c3 := 0.1$$

$$c4 := 0.125$$

$$c5 := 0.5$$

$$c6 := -0.0937$$

$$c7 := 0.63738$$

$$c8 := 0.31623$$

$$c9 := 0.35355$$

$$c10 := 0.63742$$

$$b0 := c1 \cdot zy - c2 \cdot zxxiy$$

$$b1 := c3 \cdot zx1y$$

$$b2 := c3 \cdot zx2y$$

$$b3 := c3 \cdot zx3y$$

$$b12 := c4 \cdot zx1x2y$$

$$b13 := c4 \cdot zx1x3y$$

$$b23 := c4 \cdot zx2x3y$$

$$b11 := c5 \cdot zx1x1y + c6 \cdot zxxiy - c2 \cdot zy$$

$$b22 := c5 \cdot zx2x2y + c6 \cdot zxxiy - c2 \cdot zy$$

$$b33 := c5 \cdot zx3x3y + c6 \cdot zxxiy - c2 \cdot zy$$

$$b0 = 164.9099$$

$$b1 = 17.2325$$

$$b2 = 55.4704$$

$$b3 = 7.8008$$

$$b12 = 6.3718$$

$$b13 = 2.7095$$

$$b23 = 2.2801$$

$$b11 = -26.5608$$

$$b22 = -21.0033$$

$$b33 = 37.8607$$

$$\begin{array}{l}
\vdots \\
\vdots \\
\vdots
\end{array}
\quad
ys := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 14 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + \frac{y_j}{n0} \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{cases}
\quad
s2y := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ j \leftarrow 14 \\ \text{while } n \geq j \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + \frac{(y_j - ys)^2}{f1} \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ s \end{cases}$$

$$ys := \frac{3000}{19} \quad ys = 157.8947 \quad s2y := \left(ys - \frac{3000}{20}\right)^2 + \left(ys - \frac{3000}{18}\right)^2$$

$$sy := \sqrt{\frac{s2y}{5}} \quad sy = 5.2778 \quad \text{При } a=0,05 \text{ и } f1=5 \quad t := 2.57$$

$$\begin{array}{llll}
sb0 := c7 \cdot sy & sbi := c8 \cdot sy & sbij := c9 \cdot sy & sbii := c10 \cdot sy \\
sb0 = 3.3639 & sbi = 1.669 & sbij = 1.866 & sbii = 3.3641 \\
db0 := sb0 \cdot t & dbi := sbi \cdot t & dbij := sbij \cdot t & dbii := sbii \cdot t \\
db0 = 8.6453 & dbi = 4.2893 & dbij = 4.7955 & dbii = 8.6459
\end{array}$$

$$b0 := \begin{cases} 0 & \text{if } |b0| < db0 \\ b0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad b1 := \begin{cases} 0 & \text{if } |b1| < db1 \\ b1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$b2 := \begin{cases} 0 & \text{if } |b2| < db2 \\ b2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad b3 := \begin{cases} 0 & \text{if } |b3| < db3 \\ b3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$b12 := \begin{cases} 0 & \text{if } |b12| < db12 \\ b12 & \text{otherwise} \end{cases} \quad b13 := \begin{cases} 0 & \text{if } |b13| < db13 \\ b13 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$b23 := \begin{cases} 0 & \text{if } |b23| < db23 \\ b23 & \text{otherwise} \end{cases} \quad b11 := \begin{cases} 0 & \text{if } |b11| < db11 \\ b11 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$b22 := \begin{cases} 0 & \text{if } |b22| < db22 \\ b22 & \text{otherwise} \end{cases} \quad b33 := \begin{cases} 0 & \text{if } |b33| < db33 \\ b33 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Приложение 4.1



— Коэффициенты уравнения после проверки на значимость

$$b_0 = 164.9099 \quad b_1 = 17.2325 \quad b_2 = 55.4704 \quad b_3 = 7.8008$$

$$b_{12} = 6.3718 \quad b_{13} = 0 \quad b_{23} = 0$$

$$b_{11} = -26.5608 \quad b_{22} = -21.0033 \quad b_{33} = 37.8607$$

$$k_1 = 0 \quad k_1 = \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_0 = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_1 = \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_1 = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_1 = \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_2 = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_1 = \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_3 = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_1 = \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_{12} = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_1 = \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_{13} = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_1 = \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_{23} = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_1 = \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_{11} = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_1 = \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_{22} = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_1 = \begin{cases} k_1 + 1 & \text{if } b_{33} = 0 \\ k_1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_1 = 2 \quad f_2 = k_0 - (10 - k_1) - f_2 = 5 \quad k_0 = 14$$

$$f_t = \begin{cases} 4.74 & \text{if } f_2 = 10 \\ 4.706 & \text{if } f_2 = 11 \\ 4.78 & \text{if } f_2 = 9 \\ 4.82 & \text{if } f_2 = 8 \\ 4.88 & \text{if } f_2 = 7 \\ 4.95 & \text{if } f_2 = 6 \\ 5.05 & \text{if } f_2 = 5 \\ 5.19 & \text{if } f_2 = 4 \\ 5.41 & \text{if } f_2 = 3 \end{cases}$$

$$f_t = 5.05$$

При значимости  $\alpha = 0,05$

Приложение 4.1

----- z := 0    c := 0    v := 0    a := 0

```

ssn := | s ← 0
      | j ← 0
      | while n ≥ j
      |   z ← z + b0 + b1·x1j + b2·x2j + b3·x3j
      |   c ← c + b12·x1j·x2j + b13·x1j·x3j + b23·x2j·x3j
      |   v ← v + b11·x1j·x1j + b22·x2j·x2j + b33·x3j·x3j
      |   a ← a + z + c + v
      |   s ← s + (yj - a)2
      |   j ← j + 1
      | s

```

ssn = 649.1364

SSN := ssn + n0·(b0 - ys)

SSN = 691.2275

$$s2n := \frac{SSN}{f2}$$

$$fr := \frac{s2n}{s2y}$$

n0 = 6

f2 = 5

s2n = 138.2455

s2y = 139.2736

fr = 0.9926

ft = 5.05

Проверка на адекватность

fr < ft

j := 0..n

$$yp1_j := b0 + b1 \cdot x1_j + b2 \cdot x2_j + b3 \cdot x3_j$$

$$yp2_j := b12 \cdot x1_j \cdot x2_j + b13 \cdot x1_j \cdot x3_j + b23 \cdot x2_j \cdot x3_j$$

$$yp3_j := b11 \cdot x1_j \cdot x1_j + b22 \cdot x2_j \cdot x2_j + b33 \cdot x3_j \cdot x3_j$$

$$yp := yp1 + yp2 + yp3$$

$$dy := y - yp$$

Приложение 4.1

$x_1 =$	$x_2 =$	$x_3 =$	$y =$
0   0	0   0	0   0	0   0
1   1	1   1	1   1	1   247.9339
2   -1	2   -1	2   1	2   197.3684
3   1	3   -1	3   1	3   111.9403
4   -1	4   1	4   -1	4   89.5522
5   1	5   1	5   -1	5   222.2222
6   -1	6   -1	6   -1	6   185.1852
7   1	7   -1	7   -1	7   98.0392
8   -1	8   0	8   0	8   83.7989
9   1	9   0	9   0	9   162.1622
10   -1	10   0	10   0	10   114.0684
11   0	11   1	11   0	11   186.3354
12   0	12   -1	12   0	12   101.0101

$y_p =$	$dy =$
0   0	0   0
1   242.082	1   5.8519
2   194.8735	2   2.4949
3   118.3976	3   -6.4573
4   96.6762	4   -7.1239
5   226.4805	5   -4.2582
6   179.272	6   5.9132
7   102.7961	7   -4.7568
8   81.0747	8   2.7242
9   155.5816	9   6.5806
10   121.1167	10   -7.0482
11   199.377	11   -13.0416
12   88.4362	12   12.5739

### Коэффициенты уравнения

b0 = 164.9099	b1 = 17.2325	b2 = 55.4704	b3 = 7.8008
b12 = 6.3718	b13 = 0	b23 = 0	
b11 = -26.5608	b22 = -21.0033	b33 = 37.8607	

Листинг программы

"Каноническое преобразование Вк-3"

b0 := 164.9099      b1 := 17.2325      b2 := 55.4704      b3 := 7.8008  
 b12 := 6.3718      b13 := 0      b23 := 0  
 b11 := -26.5608      b22 := -21.0033      b33 := 37.8607      zp := 1

$$2 \cdot b_{11} \cdot x_1 + b_{12} \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_3 = -b_1$$

$$b_{12} \cdot x_1 + 2 \cdot b_{22} \cdot x_2 + b_{23} \cdot x_3 = -b_2$$

$$b_{13} \cdot x_1 + b_{23} \cdot x_2 + 2 \cdot b_{33} \cdot x_3 = -b_3$$

$$M := \begin{bmatrix} 2 \cdot b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{12} & 2 \cdot b_{22} & b_{23} \\ b_{13} & b_{23} & 2 \cdot b_{33} \end{bmatrix} \quad v := \begin{bmatrix} -b_1 \\ -b_2 \\ -b_3 \end{bmatrix} \quad x := M^{-1} \cdot v \quad x = \begin{bmatrix} 0.4917 \\ 1.3951 \\ -0.103 \end{bmatrix}$$

$$x_1 := x_0 \quad x_2 := x_1 \quad x_3 := x_2$$

$$f_1(x_1, x_2, x_3) := b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$f(x_1, x_2, x_3) := f_1(x_1, x_2, x_3) + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 \quad Y_s := f(x_1, x_2, x_3)$$

$$\pi := 3.141592$$

$$b := \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{b_{23}^2}{(b_{22} - b_{33})^2} + 1}} \right] \quad \alpha := \arcsin(b) \quad \alpha = 0$$

$$B_1 := b_{11} \quad B_2 := b_{22} \cdot (\cos(\alpha))^2 + b_{33} \cdot (\sin(\alpha))^2 + b_{23} \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)$$

$$B_3 := b_{22} \cdot \sin(\alpha)^2 + b_{33} \cdot \cos(\alpha)^2 - b_{23} \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \quad \alpha := \alpha \cdot \frac{180}{\pi}$$

Приложение 4.2

$$J1 := b_{11} + b_{22} + b_{33} \quad J2 := B1 + B2 + B3$$

$$x_1 = 0.4917 \quad x_2 = 1.3951 \quad x_3 = -0.103 \quad J1 = -9.7034 \quad J2 = -9.7034$$

$$Y_s = 207.4385 \quad B1 = -26.5608 \quad B2 = -21.0033 \quad B3 = 37.8607 \quad \alpha = 0$$

Уравнение регрессии в канонической форме

$$Y - Y_s = B1 \cdot X_1^2 + B2 \cdot X_2^2 + B3 \cdot X_3^2 \text{ или}$$

$$\frac{(X_1)^2}{B1} + \frac{(X_2)^2}{B2} + \frac{(X_3)^2}{B3} - 1$$

Принимаем  $x_3 := -0.103$  тогда:

$$2 \cdot b_{11} \cdot x_1 + b_{12} \cdot x_2 - b_1 - b_{13} \cdot x_3$$

$$b_{12} \cdot x_1 + 2 \cdot b_{22} \cdot x_2 - b_2 - b_{23} \cdot x_3$$

$$M := \begin{bmatrix} 2 \cdot b_{11} & b_{12} \\ b_{12} & 2 \cdot b_{22} \end{bmatrix} \quad v := \begin{bmatrix} -b_1 - b_{13} \cdot x_3 \\ -b_2 - b_{23} \cdot x_3 \end{bmatrix} \quad x := M^{-1} \cdot v \quad x = \begin{bmatrix} 0.4917 \\ 1.3951 \end{bmatrix}$$

$$x_1 := x_0 \quad x_2 := x_1$$

$$f_1(x_1, x_2) := b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$f(x_1, x_2) := f_1(x_1, x_2) + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 \quad Y_s := f(x_1, x_2)$$

$$b := \begin{cases} \frac{b_{12}}{b_{11} - b_{22}} & \text{if } b_{12} = 0 \\ \frac{b_{11} - b_{22}}{b_{12}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \alpha := \begin{cases} \frac{\text{atan}(b)}{2} & \text{if } b_{12} = 0 \\ \frac{45 \cdot \pi}{180} & \text{if } b_{11} = b_{22} \\ \frac{\text{atan}\left(\frac{1}{b}\right)}{2} & \text{if } b \neq 0 \end{cases}$$

Приложение 4.2

$$E := \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A := \begin{bmatrix} b_{11} & \frac{b_{12}}{2} \\ \frac{b_{12}}{2} & b_{22} \end{bmatrix} \quad \alpha := \alpha \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$B^2 - B \cdot (b_{11} + b_{22}) + \left[ b_{11} \cdot b_{22} - \left( \frac{b_{12}}{2} \right)^2 \right] = 0$$

$$C := \text{eigenvals}(A) \quad C = \begin{bmatrix} -28.0095 \\ -19.5546 \end{bmatrix} \quad B_{11} := C_0 \quad B_{22} := C_1$$

$$Y_s = 207.4385 \quad B_{11} = -28.0095 \quad B_{22} = -19.5546 \quad \alpha = -24.4525$$

$$x_1 = 0.4917 \quad x_2 = 1.3951$$

$$J_1 := b_{11} + b_{22} \quad J_2 := B_{11} + B_{22} \quad J_1 = -47.5641 \quad J_2 = -47.5641$$

Уравнение регрессии в канонической форме

$$Y - Y_s = B_{11} \cdot X_1^2 + B_{22} \cdot X_2^2 \text{ или}$$

$$\frac{\left( \frac{X_1}{B_{11}} \right)^2}{Y - Y_s} + \frac{\left( \frac{X_2}{B_{22}} \right)^2}{Y - Y_s} = 1$$

$$kk := 40 \quad X_1 := 0..kk \quad X_2 := 0..kk$$

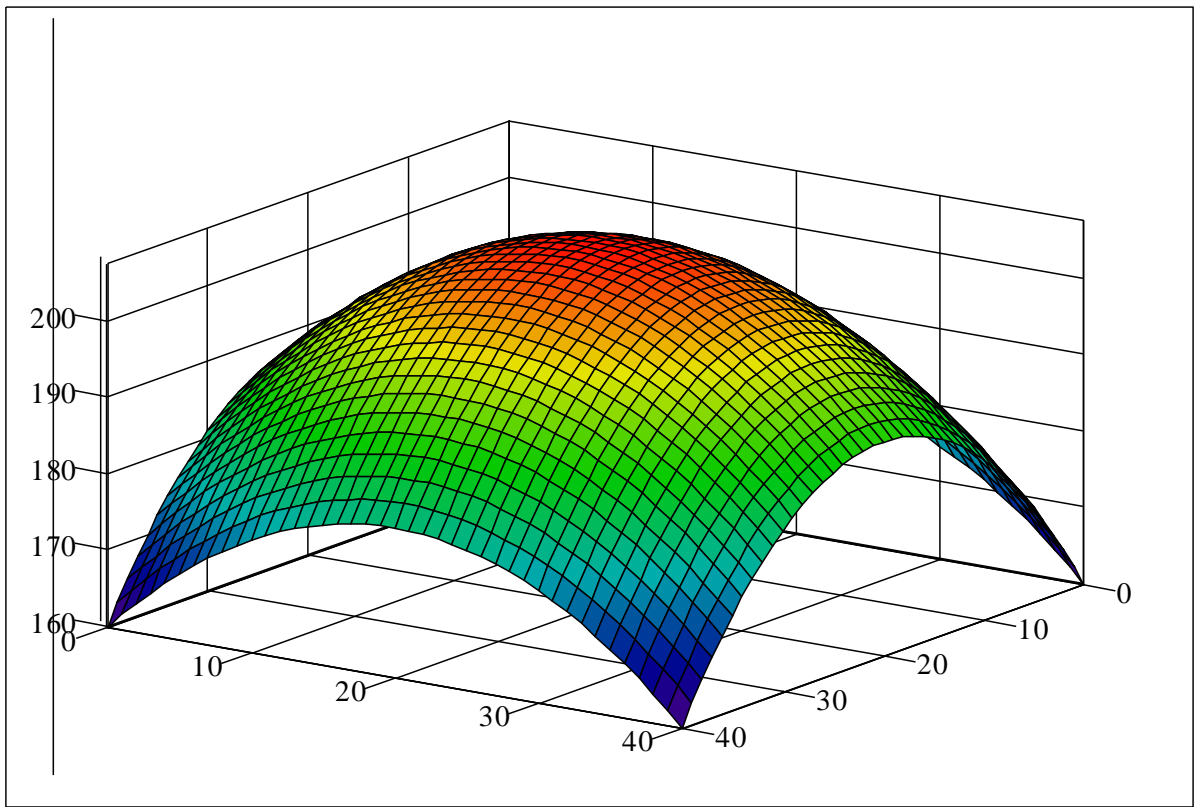
$$X_{22}(X_2) := -z_p + 2 \cdot \frac{z_p}{kk} \cdot X_2$$

$$X_{11}(X_1) := -z_p + 2 \cdot \frac{z_p}{kk} \cdot X_1$$

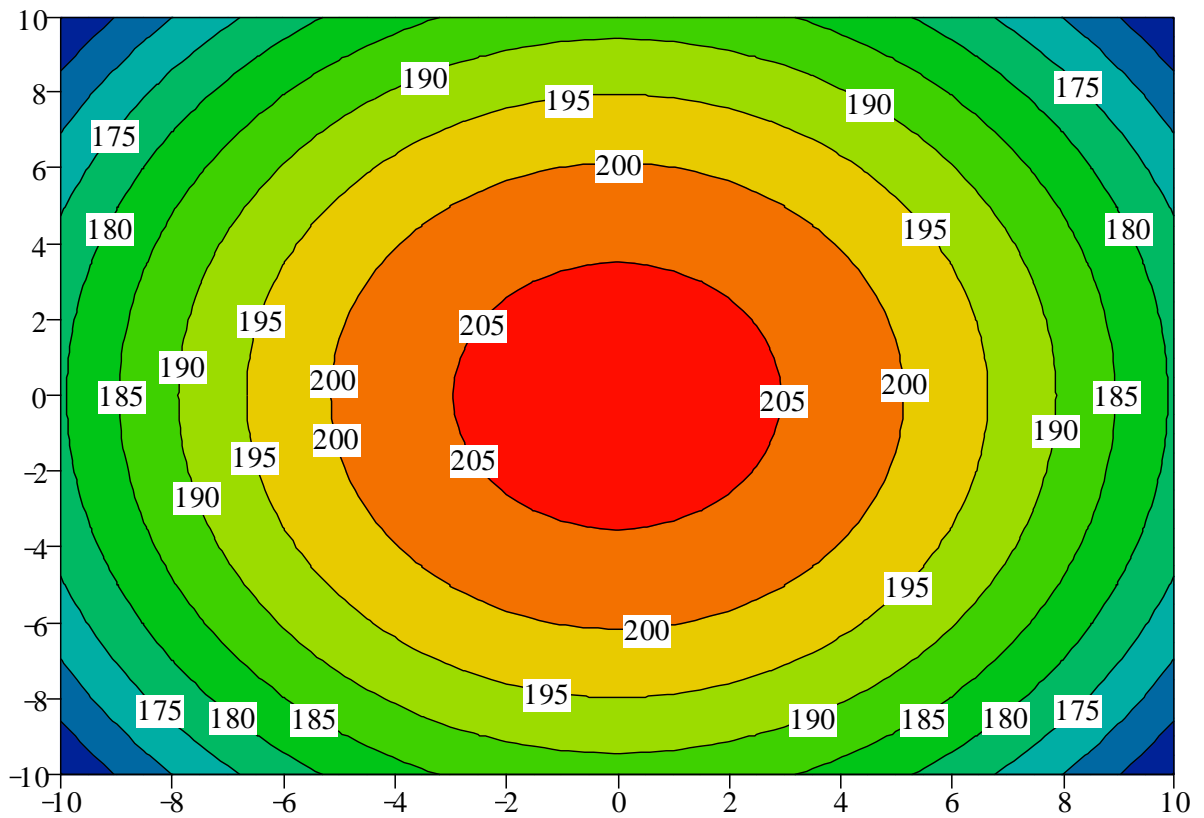
$$z(X_{11}, X_{22}) := Y_s + B_{11} \cdot X_{11}(X_1) \cdot X_{11}(X_1) + B_{22} \cdot X_{22}(X_2) \cdot X_{22}(X_2)$$

$$K_{X_1, X_2} := z(X_{11}, X_{22})$$

Приложение 4.2



K



K

Приложение 4.2

Принимаем  $x_2 := 1.3951$  тогда:

$$2 \cdot b_{11} \cdot x_1 + b_{13} \cdot x_3 = -b_1 - b_{12} \cdot x_2$$

$$b_{13} \cdot x_1 + 2 \cdot b_{33} \cdot x_3 = -b_3 - b_{23} \cdot x_2$$

$$M := \begin{bmatrix} 2 \cdot b_{11} & b_{13} \\ b_{13} & 2 \cdot b_{33} \end{bmatrix} \quad v := \begin{bmatrix} -b_1 - b_{12} \cdot x_2 \\ -b_3 - b_{23} \cdot x_2 \end{bmatrix} \quad x := M^{-1} \cdot v \quad x = \begin{bmatrix} 0.4917 \\ -0.103 \end{bmatrix}$$

$$x_1 := x_0 \quad x_3 := x_1$$

$$f_1(x_1, x_3) := b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$f(x_1, x_3) := f_1(x_1, x_3) + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 \quad Y_s := f(x_1, x_3)$$

$$b := \begin{cases} \frac{b_{13}}{b_{11} - b_{33}} & \text{if } b_{13} = 0 \\ \frac{b_{11} - b_{33}}{b_{13}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \alpha := \begin{cases} \frac{\text{atan}(b)}{2} & \text{if } b_{13} = 0 \\ \frac{45 \cdot \pi}{180} & \text{if } b_{11} = b_{33} \\ \frac{\text{atan}\left(\frac{1}{b}\right)}{2} & \text{if } b \neq 0 \end{cases}$$

$$E := \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A := \begin{bmatrix} b_{11} & \frac{b_{13}}{2} \\ \frac{b_{13}}{2} & b_{33} \end{bmatrix} \quad \alpha := \alpha \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$B^2 = B \cdot (b_{11} + b_{33}) + \left[ b_{11} \cdot b_{33} - \left(\frac{b_{13}}{2}\right)^2 \right] - 0$$

$$C := \text{eigenvals}(A) \quad C = \begin{bmatrix} -26.5608 \\ 37.8607 \end{bmatrix} \quad B_{11} := C_0 \quad B_{33} := C_1$$

$$Y_s = 207.4385 \quad B_{11} = -26.5608 \quad B_{33} = 37.8607 \quad \alpha = 0$$

Приложение 4.2



$$x_1 = 0.4917$$

$$x_3 = -0.103$$

$$J_1 := b_{11} + b_{33}$$

$$J_2 := B_{11} + B_{33}$$

$$J_1 = 11.2999$$

$$J_2 = 11.2999$$

Уравнение регрессии в канонической форме

$$Y - Y_s = B_{11} \cdot X_1^2 + B_{33} \cdot X_3^2 \text{ или}$$

$$\frac{(X_1)^2}{\frac{Y - Y_s}{B_{11}}} + \frac{(X_3)^2}{\frac{Y - Y_s}{B_{33}}} = 1$$

$$kk := 40$$

$$X_1 := 0..kk$$

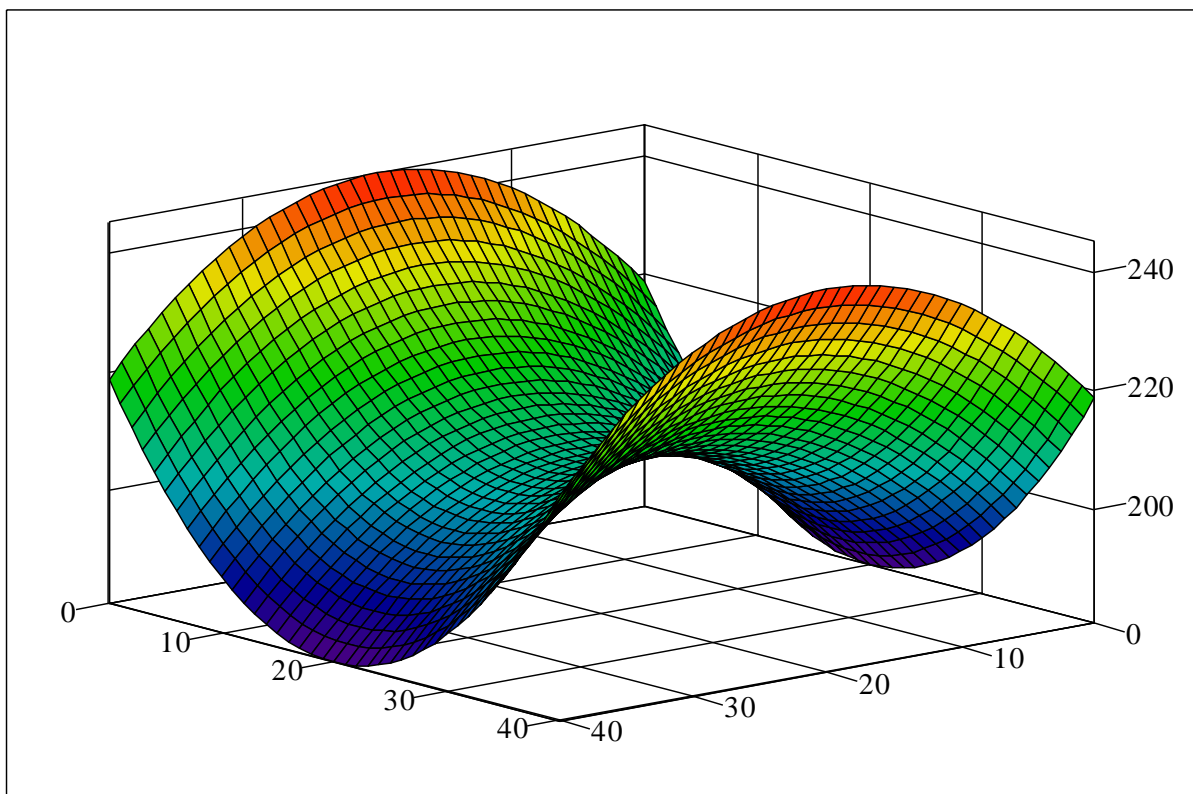
$$X_3 := 0..kk$$

$$X_{11}(X_1) := -z_p + 2 \cdot \frac{z_p}{kk} \cdot X_1$$

$$X_{33}(X_3) := -z_p + 2 \cdot \frac{z_p}{kk} \cdot X_3$$

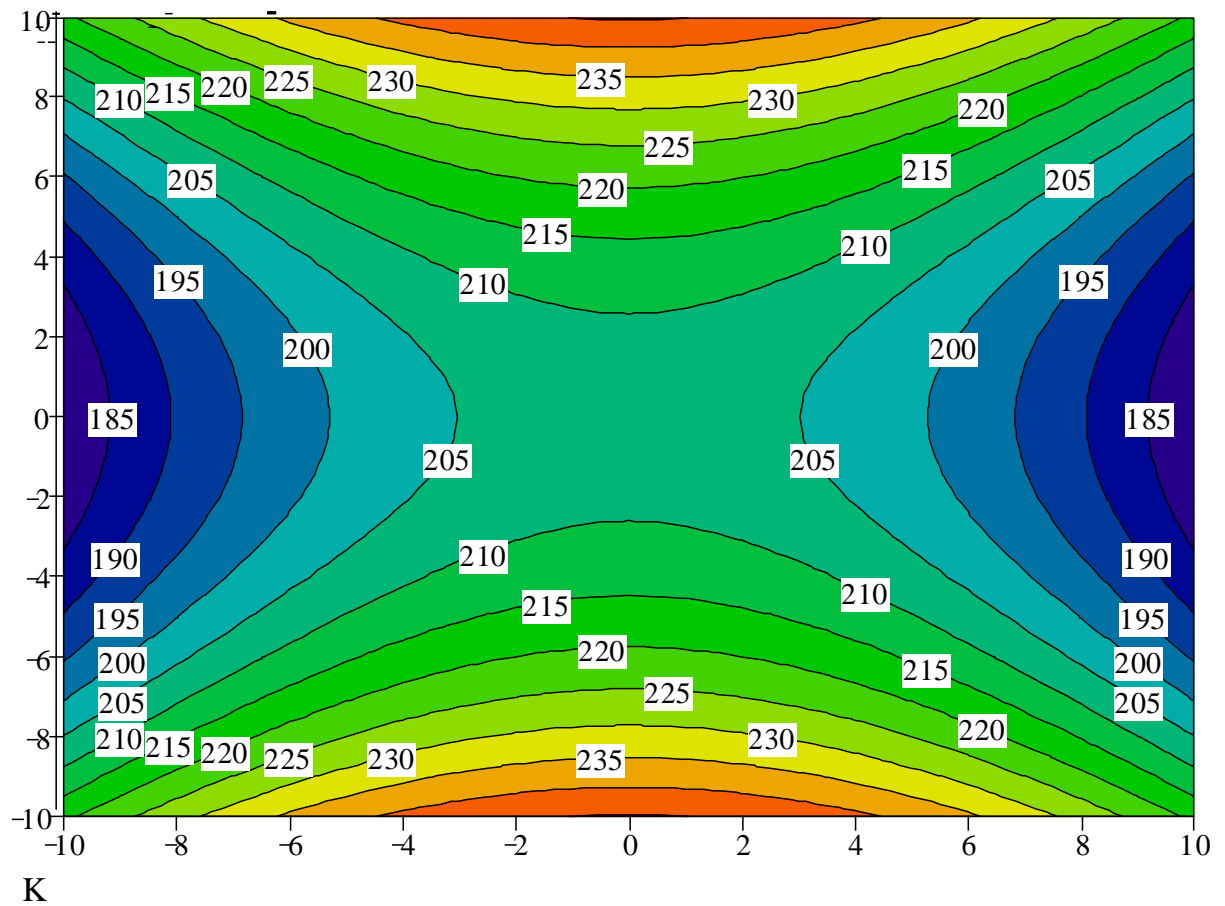
$$z(X_{11}, X_{33}) := Y_s + B_{11} \cdot X_{11}(X_1) \cdot X_{11}(X_1) + B_{33} \cdot X_{33}(X_3) \cdot X_{33}(X_3)$$

$$K_{X_1, X_3} := z(X_{11}, X_{33})$$



К

Приложение 4.2



Принимаем  $x_1 := 0.4917$  тогда:

$$2 \cdot b_{22} \cdot x_2 + b_{23} \cdot x_3 = -b_2 - b_{12} \cdot x_1$$

$$b_{23} \cdot x_2 + 2 \cdot b_{33} \cdot x_3 = -b_3 - b_{13} \cdot x_1$$

$$M := \begin{bmatrix} 2 \cdot b_{22} & b_{23} \\ b_{23} & 2 \cdot b_{33} \end{bmatrix} \quad v := \begin{bmatrix} -b_2 - b_{12} \cdot x_1 \\ -b_3 - b_{13} \cdot x_1 \end{bmatrix} \quad x := M^{-1} \cdot v \quad x = \begin{bmatrix} 1.3951 \\ -0.103 \end{bmatrix}$$

$$x_2 := x_0$$

$$x_3 := x_1$$

$$f_1(x_2, x_3) := b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$f(x_2, x_3) := f_1(x_2, x_3) + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2$$

$$Y_s := f(x_2, x_3)$$

Приложение 4.2

$$b := \begin{cases} \frac{b_{23}}{b_{22} - b_{33}} & \text{if } b_{23} = 0 \\ \frac{b_{22} - b_{33}}{b_{23}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \alpha := \begin{cases} \frac{\text{atan}(b)}{2} & \text{if } b_{23} = 0 \\ \frac{45 \cdot \pi}{180} & \text{if } b_{22} = b_{33} \\ \frac{\text{atan}\left(\frac{1}{b}\right)}{2} & \text{if } b \neq 0 \end{cases}$$

$$E := \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A := \begin{bmatrix} b_{22} & \frac{b_{23}}{2} \\ \frac{b_{23}}{2} & b_{33} \end{bmatrix} \quad \alpha := \alpha \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$B^2 - B \cdot (b_{22} + b_{33}) + \left[ b_{22} \cdot b_{33} - \left( \frac{b_{23}}{2} \right)^2 \right] = 0$$

$$C := \text{eigenvals}(A) \quad C = \begin{bmatrix} -21.0033 \\ 37.8607 \end{bmatrix} \quad B_{22} := C_0 \quad B_{33} := C_1$$

$$Y_s = 207.4385 \quad B_{22} = -21.0033 \quad B_{33} = 37.8607 \quad \alpha = 0$$

$$x_2 = 1.3951 \quad x_3 = -0.103$$

$$J_1 := b_{22} + b_{33} \quad J_2 := B_{22} + B_{33} \quad J_1 = 16.8574 \quad J_2 = 16.8574$$

Уравнение регрессии в канонической форме

$$Y - Y_s = B_{22} \cdot X_2^2 + B_{33} \cdot X_3^2 \text{ или}$$

$$\frac{(X_2)^2}{\frac{Y - Y_s}{B_{22}}} + \frac{(X_3)^2}{\frac{Y - Y_s}{B_{33}}} = 1$$

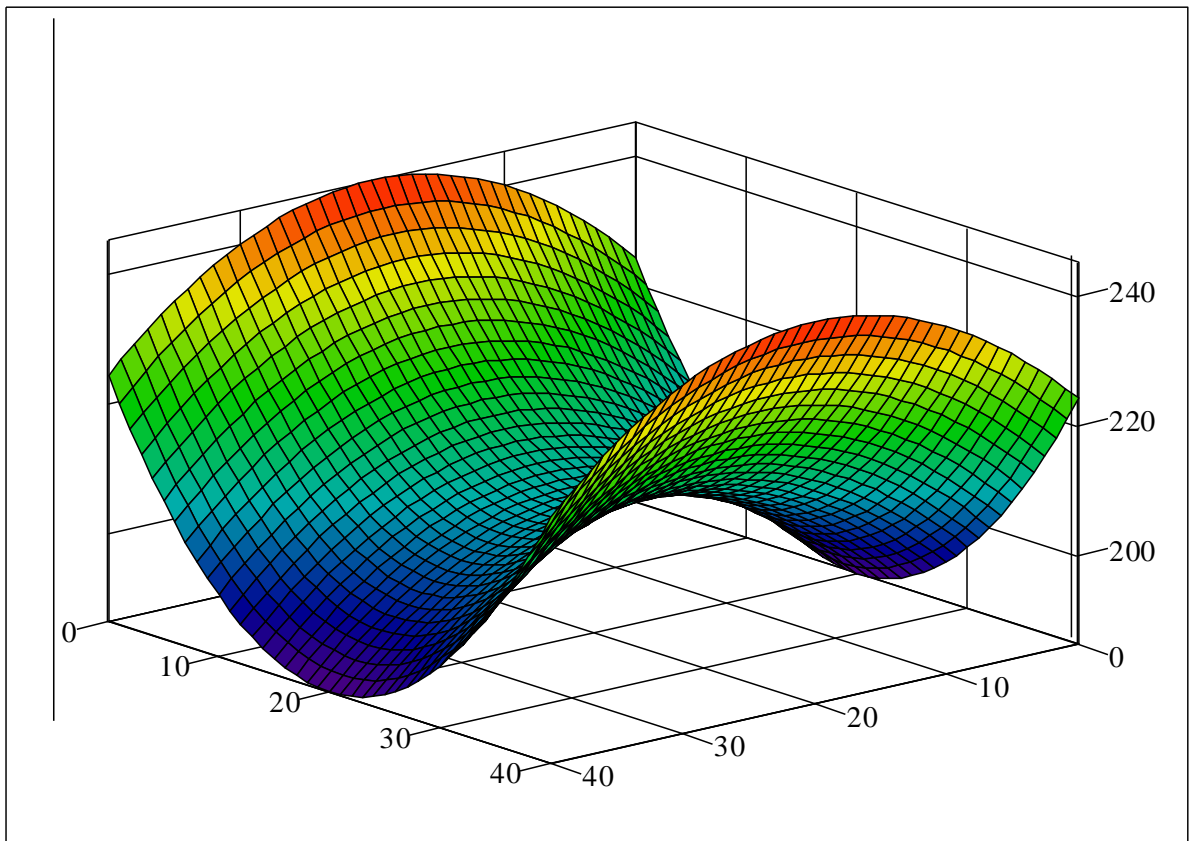
$$kk := 40 \quad X_2 := 0..kk \quad X_3 := 0..kk$$

$$X_{22}(X_2) := -z_p + 2 \cdot \frac{z_p}{kk} \cdot X_2 \quad X_{33}(X_3) := -z_p + 2 \cdot \frac{z_p}{kk} \cdot X_3$$

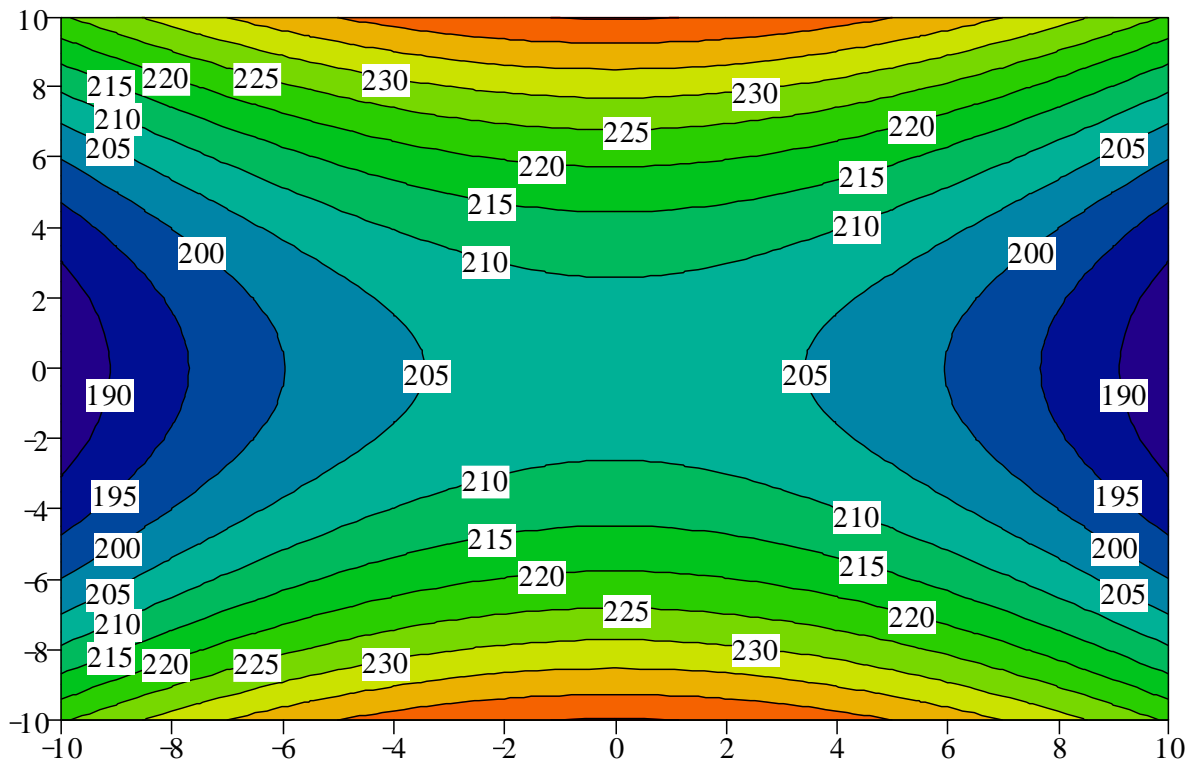
$$z(X_{22}, X_{33}) := Y_s + B_{22} \cdot X_{22}(X_2) \cdot X_{22}(X_2) + B_{33} \cdot X_{33}(X_3) \cdot X_{33}(X_3)$$

$$K_{X_2, X_3} := z(X_{22}, X_{33})$$

Приложение 4.2



K



K

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Математическое моделирование для  
расчета двукратной и не обработанной площади в зависимости от  
угла установки рабочего органа, диаметра штамба  
и расстояния между штамбами

Приложение 5

## Площади обработки вокруг штамба многолетних насаждений

Исходные данные					
$\alpha := 60$	$S := 3000$	$D := 200$	$H := 500$	$z_p := 300$	$V := 5$
$S_p := 400$	$V_p := \frac{V}{3.6}$	$V_p = 1.389$	$R := \frac{D}{2}$	$R = 100$	

где :  $V_p$  - рабочая скорость агрегата, м/с;

$V$  - рабочая скорость агрегата, км/час;

$\alpha$  - начальный угол установки рабочего органа, градус;

$D$  - диаметр штамба дерева, мм;

$H$  - расстояние от центра штамба до агрегата, мм;

$z_p$  - зона перекрытия при работе агрегата, мм;

$R$  - радиус штамба дерева, мм;

$S$  - расстояние между штамбами дерева, мм;

$S_p$  - путь пройденный до установки рабочего органа в первоначальный угол, мм.

Определяем длину рабочего органа.

$$\alpha_r := \pi \cdot \frac{\alpha}{180} \quad \alpha_r = 1.047 \quad L := \frac{\left(H + \frac{z_p}{2}\right)}{\sin(\alpha_r)} \quad L = 750.555 \quad (1)$$

где :  $L$  - длина рабочего органа, мм;

$\alpha_r$  - начальный угол установки рабочего органа, радиан.

Определяем координаты точки  $A(x_1, y_1)$  конца рабочего органа.

Из рисунка 1 следует, что:

$$ED = R \quad EC = H \quad EF = \frac{z_p}{2} \quad AB = L \quad x_1 = AG \quad y_1 = GC - GB - CB$$

$$x_1 := H + \frac{z_p}{2} \quad x_1 = 650 \quad EK = \frac{R}{\cos(\alpha)} \quad KC = EC - EK = H - \frac{R}{\cos(\alpha)}$$

$$GB = L \cos(\alpha) \quad EK \cos(\alpha) = ED = R \quad KC := H - \frac{R}{\cos(\alpha)} \quad KC = 300$$

$$\frac{KC}{CB} = \operatorname{tg}(\alpha) \quad CB = \frac{\left(H - \frac{R}{\cos(\alpha)}\right)}{\operatorname{tg}(\alpha)} = \frac{(H \cos(\alpha) - R)}{\sin(\alpha)} \quad y_1 := L \cdot \cos(\alpha_r) - \frac{(H \cdot \cos(\alpha_r) - R)}{\sin(\alpha_r)}$$

$$CB := \frac{-(H \cdot \cos(\alpha_r) - R)}{\sin(\alpha_r)} \quad CB = -173.205 \quad y_1 = 202.073$$

Приложение 5

Для построения рисунка 1 проводим дополнительные расчеты при построении в среде Mathcad - 2000.

$$x0 := H - R, H - R + 1 .. H + R \quad F1(x0) := \sqrt{R^2 - (x0 - H)^2} \quad F2(x0) := -\sqrt{R^2 - (x0 - H)^2}$$

$$b1 := y1 - \frac{x1}{\tan(\alpha r)} \quad xk := 0, 1 .. x1 \quad F3(xk) := \frac{xk}{\tan(\alpha r)} + b1 \quad x1k := H - R \cdot \cos(\alpha r)$$

$$y1k := R \cdot \sin(\alpha r) \quad x01 := x1k, x1k + 1 .. H \quad F6(x01) := \left( \frac{x01 - H}{x1k - H} \right) \cdot y1k \quad \alpha0r := \arccos\left(\frac{R}{H}\right)$$

$$b1 = -173.205 \quad x1k = 450 \quad y1k = 86.603 \quad \alpha0r = 1.369 \quad \alpha0 := \alpha0r \cdot \frac{180}{\pi}$$

где: координаты точки касания Д (x1k,y1k)  $\alpha0 = 78.463$   $m := 0, 1 .. y1$

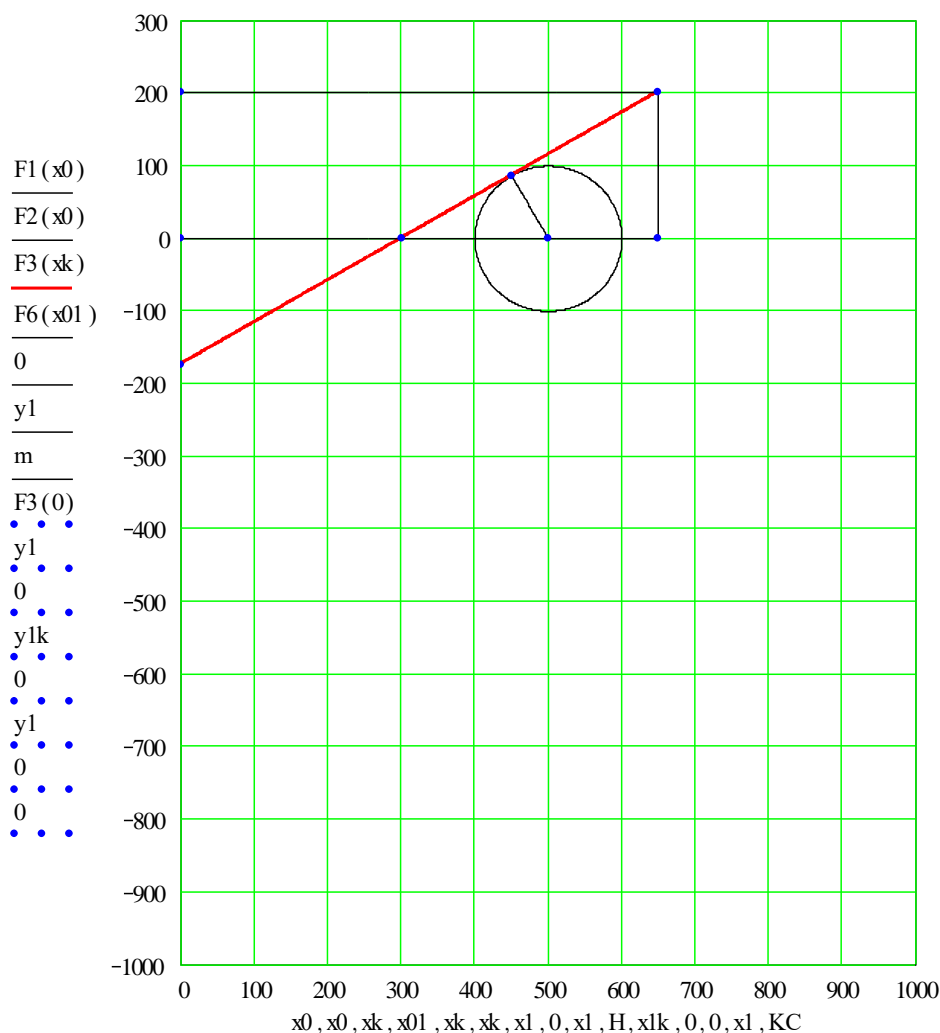


Рисунок П4.1 Расположение рабочего органа относительно штамба в момент касания

Определение угла наклона рабочего органа ( $\alpha_1$ ), при котором рабочий орган начинает обходить (скользить) по штамбу дерева см. рис. 2.

$$EK + KC - H \quad (2)$$

$$EK = \frac{AE}{\cos(\alpha_1)} - \frac{R}{\cos(\alpha_1)} \quad KC = KB \sin(\alpha_1) \quad KB = AB - AK - L - \frac{R}{\operatorname{ctg}(\alpha_1)}$$

$$AK = \frac{AE}{\operatorname{ctg}(\alpha_1)} - \frac{R}{\operatorname{ctg}(\alpha_1)} \quad KC = (AB - AK) \sin(\alpha_1) - \left( L - \frac{R}{\operatorname{ctg}(\alpha_1)} \right) \sin(\alpha_1)$$

Подставляя значения EK и KC в формулу (2) получим:

$$\frac{R}{\cos(\alpha_1)} + \left( L - \frac{R}{\operatorname{ctg}(\alpha_1)} \right) \sin(\alpha_1) - H \quad \frac{R}{\cos(\alpha_1)} + L \sin(\alpha_1) - \frac{R \sin^2(\alpha_1)}{\cos(\alpha_1)} - H$$

$$R - L \sin(\alpha_1) \cos(\alpha_1) - R \sin^2(\alpha_1) - H \cos(\alpha_1) \quad (3)$$

Для нахождения угла проводим преобразование уравнения (3).

$$H \left[ \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2}} \right] + R \left[ \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2}} \right]^2 - L \left[ \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2}} \right] \left[ \frac{1 - \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2}} \right] - R$$

$$H \cdot \left[ \frac{\left( 1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2} \right) \left( 1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2} \right)}{\left( 1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2} \right)^2} \right] + \frac{R 4 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2}}{\left( 1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2} \right)^2} - \frac{L 2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} \left( 1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2} \right)}{\left( 1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2} \right)^2} - R$$

$$H \left( 1 - \operatorname{tg}^4 \frac{\alpha_1}{2} \right) + 4 R \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2} - 2 L \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} + 2 L \operatorname{tg}^3 \frac{\alpha_1}{2} - R \left( 1 + 2 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2} + \operatorname{tg}^4 \frac{\alpha_1}{2} \right)$$

Получим:

$$H - H \operatorname{tg}^4 \frac{\alpha_1}{2} - R \operatorname{tg}^4 \frac{\alpha_1}{2} + 2 L \operatorname{tg}^3 \frac{\alpha_1}{2} + 4 R \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2} - 2 R \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2} - 2 L \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} - R - 0$$

Принимая,  $x = \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}$  уравнение (3) запишется в следующем виде:

$$(-H - R) x^4 + 2 L x^3 + 2 R x^2 - 2 L x + (H - R) - 0 \quad (4)$$

Заменяя:  $a_4 := -H - R$   $a_3 := 2 \cdot L$   $a_2 := 2 \cdot R$   $a_1 := -2 \cdot L$   $a_0 := H - R$

$$\text{Получим:} \quad a_4 x^4 + a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 - 0 \quad (5)$$

Приложение 5



Решаем уравнение (5) по программе root в среде Mathcad-2000 относительно x.

--

$$F(x) := a_4 \cdot x^4 + a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0 \quad x := 0 \quad z := \text{root}(F(x), x) \quad z = 0.303$$

$$\alpha_{1r} := 2 \cdot \text{atan}(z) \quad \alpha_{1r} = 0.589 \quad \alpha_1 := \alpha_{1r} \cdot \frac{180}{\pi} \quad \alpha_1 = 33.737$$

где:  $\alpha_{1r}$  - определяемый угол, радиан;

$\alpha_1$  - определяемый угол установки рабочего органа, градус.

$$ss := \frac{\left(-L + \sqrt{L^2 - H^2 + R^2}\right)}{(-H - R)} \quad ss = 0.303 \quad sss := \frac{\left(-L - \sqrt{L^2 - H^2 + R^2}\right)}{(-H - R)} \quad sss = 2.199$$

Проверяем решение уравнения (5) по программе polyroots в среде Mathcad-2000.

$$V_0 := a_0 \quad V_1 := a_1 \quad V_2 := a_2 \quad V_3 := a_3 \quad V_4 := a_4 \quad \text{polyroots}(V) = \begin{bmatrix} -1 \\ 0.303 \\ 1 \\ 2.199 \end{bmatrix}$$

Определяем координаты точки A(x2,y2) при угле наклона рабочего органа  $\alpha_1$ .

$$y_2 - GB - CB \quad CB - KB \cos(\alpha_1) \quad CB - \left(L - \frac{R}{\text{ctg}(\alpha_1)}\right) \cos(\alpha_1)$$

$$y_2 = L \cos(\alpha_1) - L \cos(\alpha_1) + \frac{R \cos(\alpha_1)}{\text{ctg}(\alpha_1)} - R \sin(\alpha_1) \quad y_2 := R \cdot \sin(\alpha_{1r}) \quad y_2 = 55.538$$

$$x_2 := L \cdot \sin(\alpha_{1r}) \quad x_2 = 416.84$$

Для построения рисунка 2 проводим дополнительные расчеты при построении в среде Mathcad - 2000.

$$b_2 := y_2 - \frac{x_2}{\tan(\alpha_{1r})} \quad b_2 = -568.624 \quad x_{22} := 0, 1.. x_2 \quad F_4(x_{22}) := \frac{x_{22}}{\tan(\alpha_{1r})} + b_2$$

$$x_{00} := x_2, x_2 + 1.. H \quad F_5(x_{00}) := \left(\frac{x_{00} - H}{x_2 - H}\right) \cdot y_2 \quad x_{11} := 0, 1.. H$$

$$kc_2 := (L - R \cdot \tan(\alpha_{1r})) \cdot \sin(\alpha_{1r}) \quad kc_2 = 379.75$$

Приложение 5

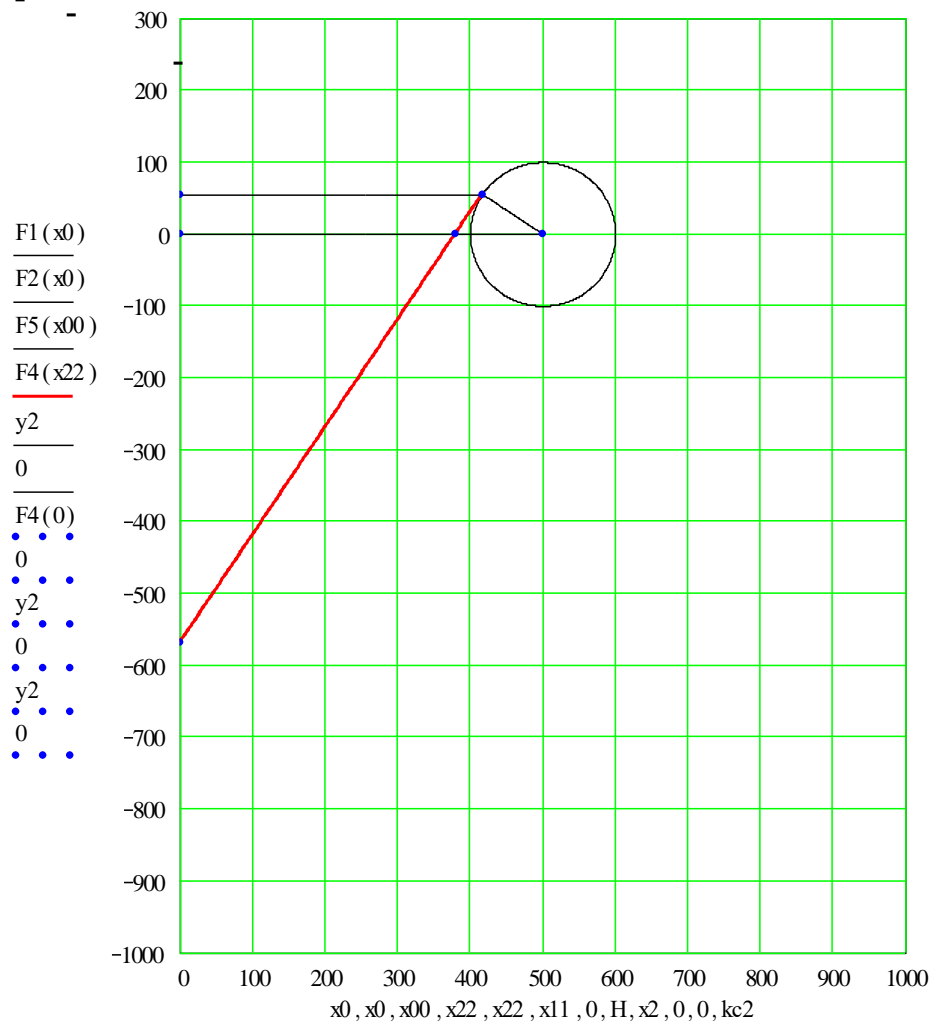


Рисунок П4.2 Расположение рабочего органа относительно штамба в момент начала обхода (скольжения) по штамбу дерева

Для определения функции траектории движения рабочего органа от момента касания до начала скольжения его по штамбу дерева определим координаты конца рабочего органа в среднем положении, обозначив его  $\alpha_3$ .

Среднее положение рабочего органа в интервале от угла  $\alpha$  до угла  $\alpha_1$ , см. рис. 3.

Определим координаты т.А( $x_3, y_3$ ) в положении рабочего органа под углом  $\alpha_3$ .

$$\alpha_1 \leq \alpha_3 < \alpha \quad \alpha_3 r := \frac{(\alpha r + \alpha_1 r)}{2} \quad \alpha_3 r = 0.818 \quad x_3 := L \cdot \sin(\alpha_3 r) \quad x_3 = 547.743$$

$$y_3 - GB - GC \quad GB = L \cos \alpha_3 \quad EK \cos \alpha_3 - R \quad EK = \frac{R}{\cos \alpha_3} \quad KC = H - EK = H - \frac{R}{\cos \alpha_3}$$

$$\frac{KC}{CB} = \operatorname{tg} \alpha_3 \quad CB = \frac{KC}{\operatorname{tg} \alpha_3} = \frac{H - \frac{R}{\cos \alpha_3}}{\operatorname{tg} \alpha_3} = \frac{H \cos \alpha_3 - R}{\sin \alpha_3} \quad y_3 := L \cdot \cos(\alpha_3 r) - \frac{(H \cdot \cos(\alpha_3 r) - R)}{\sin(\alpha_3 r)}$$

Приложение 5

Для построения рисунка 3 проводим дополнительные расчеты при построении в среде Mathcad - 2000.

$$b3 := y3 - \frac{x3}{\tan(\alpha3r)} \quad b3 = -331.384 \quad x33 := 0, 1.. x3 \quad F7(x33) := \frac{x33}{\tan(\alpha3r)} + b3$$

$$x3k := H - R \cdot \cos(\alpha3r) \quad x3k = 431.632 \quad y3k := R \cdot \sin(\alpha3r) \quad y3k = 72.978$$

$$x02 := x3k, x3k + 1.. H \quad F8(x02) := \left( \frac{x02 - H}{x3k - H} \right) \cdot y3k \quad y3 = 181.754 \quad xp := H - \frac{R}{\cos(\alpha3r)}$$

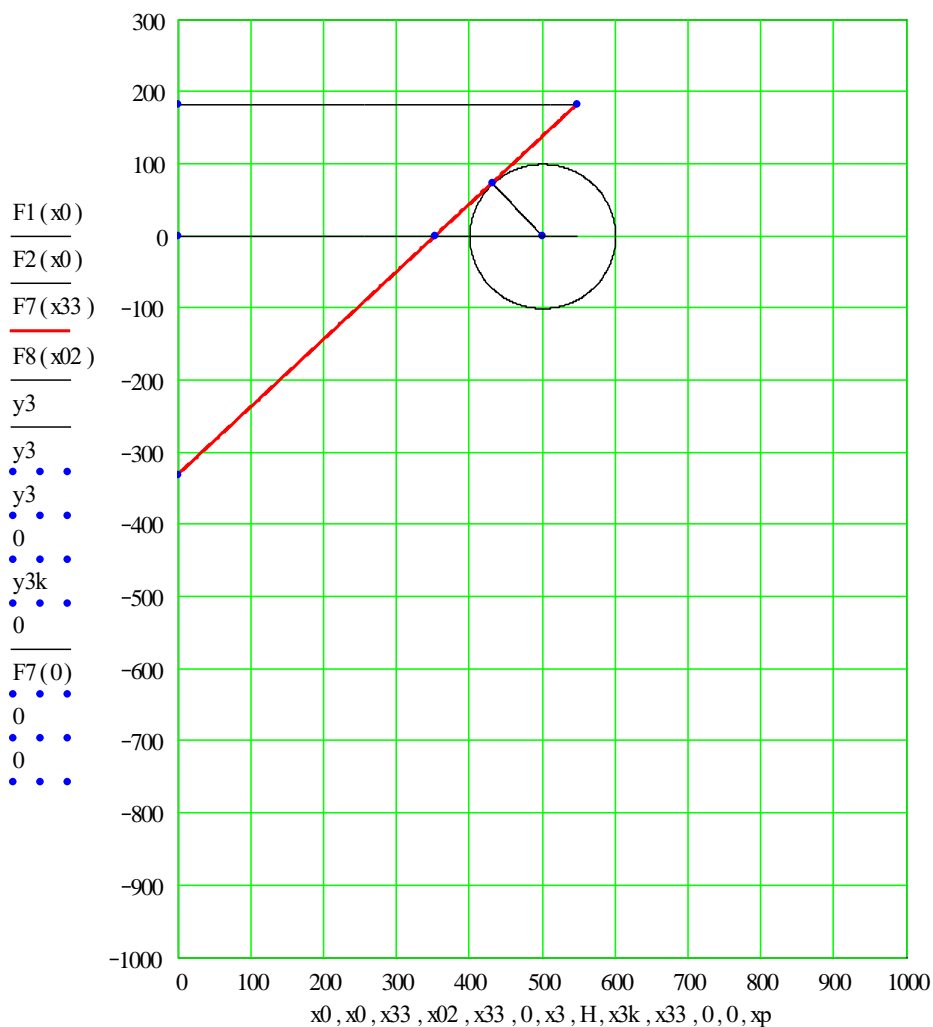


Рисунок П4.3 Среднее положение рабочего органа в момент обхода штамба

Для построения рисунка 4 разобьём диапазон изменения угла  $\alpha_3$  на 11 частей, т.е. получим 12 точек  $A_i$  конца рабочего органа для аппроксимации уравнения обратного хода рабочего органа.

$$k := 11 \quad k_k := \frac{(\alpha_r - \alpha_{1r})}{k} \quad k_k = 0.04167$$

где:  $k$  - количество отрезков,  
 $k_k$  - шаг изменения угла  $\alpha_3$ , рад.

$$\alpha_3 := \alpha_{1r}, \alpha_{1r} + k_k, \dots, \alpha_r \quad \alpha_{1r} = 0.589 \quad \alpha_r = 1.047$$

$$y_{31}(\alpha_3) := L \cdot \cos(\alpha_3) - \frac{(H \cdot \cos(\alpha_3) - R)}{\sin(\alpha_3)} \quad x_{31}(\alpha_3) := L \cdot \sin(\alpha_3)$$

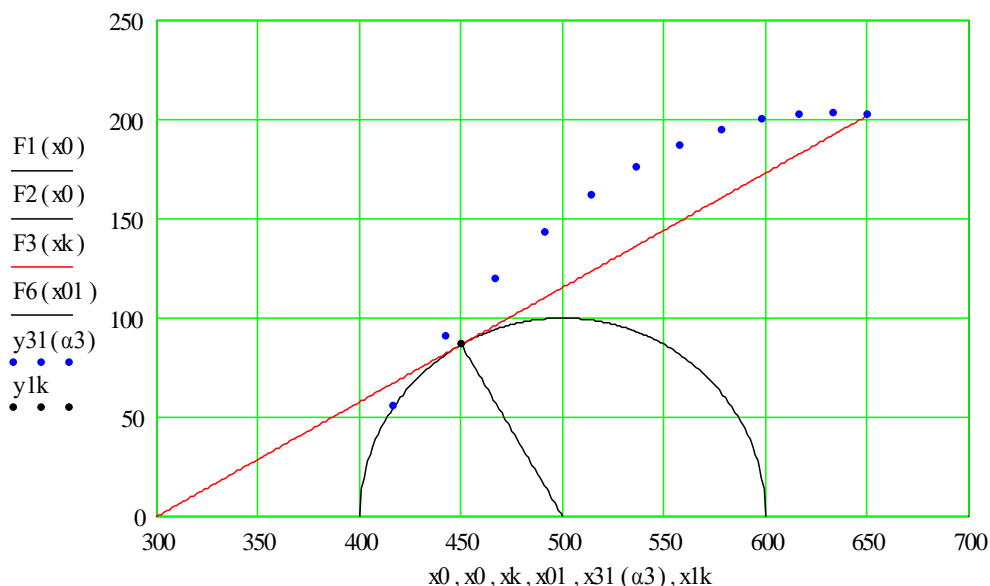


Рисунок П4.4 Промежуточные положения конца рабочего органа при обходе штамба от угла  $\alpha_1$  до угла  $\alpha_3$ .

Промежуточные значения координат конца рабочего органа т. А ( $x_3, y_3$ ) заносим в вектора  $VX$  и  $VY$ , затем по функции  $linfit(VX, YV, F)$  - возвращает вектор коэффициентов линейной регрессии общего вида  $K$ , при котором среднеквадратичная погрешность приближения "облака" исходных точек, коэффициенты которых хранятся в векторах  $VX$  и  $VY$ , оказываются минимальной.

$$\begin{array}{l}
 \text{VY} := \begin{bmatrix} y31(a1r + 0 \cdot kk) \\ y31(a1r + 1 \cdot kk) \\ y31(a1r + 2 \cdot kk) \\ y31(a1r + 3 \cdot kk) \\ y31(a1r + 4 \cdot kk) \\ y31(a1r + 5 \cdot kk) \\ y31(a1r + 6 \cdot kk) \\ y31(a1r + 7 \cdot kk) \\ y31(a1r + 8 \cdot kk) \\ y31(a1r + 9 \cdot kk) \\ y31(a1r + 10 \cdot kk) \\ y31(a1r + 11 \cdot kk) \end{bmatrix} \\
 \text{VX} := \begin{bmatrix} x31(a1r + 0 \cdot kk) \\ x31(a1r + 1 \cdot kk) \\ x31(a1r + 2 \cdot kk) \\ x31(a1r + 3 \cdot kk) \\ x31(a1r + 4 \cdot kk) \\ x31(a1r + 5 \cdot kk) \\ x31(a1r + 6 \cdot kk) \\ x31(a1r + 7 \cdot kk) \\ x31(a1r + 8 \cdot kk) \\ x31(a1r + 9 \cdot kk) \\ x31(a1r + 10 \cdot kk) \\ x31(a1r + 11 \cdot kk) \end{bmatrix} \\
 \text{F(x)} := \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \end{bmatrix} \\
 \text{K} := \text{linfit}(\text{VX}, \text{VY}, \text{F}) \\
 \text{K} = \begin{bmatrix} -1096.88926 \\ 4.14438 \\ -0.0033 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Вектор F записывается в символьном виде (1,x,x^2). После аппроксимации получим уравнение вида y=ax^2+bx+c.

$$\begin{array}{ll}
 \text{где: } a := K_2 & a = -0.0033 \\
 b := K_1 & b = 4.14438 \\
 c := K_0 & c = -1096.889
 \end{array}$$

Подставляя значения точек в полученное уравнение находим сумму квадратов отклонений для расчёта дисперсии при проверке на адекватность.

$$n := \text{length}(\text{VX}) - 1 \quad i := 0..n$$

$$\text{Sn} := \sum_i \left[ \text{VY}_i - \left[ K_2 \cdot (\text{VX}_i)^2 + K_1 \cdot \text{VX}_i + K_0 \right] \right]^2 \quad \text{Sn} = 4.84542 \quad \text{SS} := \frac{\text{Sn}}{n} \quad \text{SS} = 0.44049$$

При степени свободы равном 11 дисперсия SS составила 0,44, это свидетельствует что уравнение адекватно и им можно пользоваться в дальнейших расчётах.

Для построения рисунка 5 проведём дополнительные расчёты. Определим уравнение касательной и точку касания т.М( xk0, yk0 ) смотри рис. 5.

$$n = 11 \quad g(t) := F(t) \cdot K \quad t := \text{VX}_0, \text{VX}_0 + 0.1 .. \text{VX}_n$$

$$\text{F9(x)} := 2 \cdot K_2 \cdot x + K_1 - \frac{1}{\tan(\ar)} \quad \text{xk0} := \text{root}(\text{F9}(x), x)$$

Приложение 5

$$x = 800 \quad xk0 = 539.983$$

$$VV_0 := K_1 - \frac{1}{\tan(\alpha r)} \quad VV_1 := 2 \cdot K_2 \quad \text{polyroots}(VV) = 539.983$$

$$yk0 := K_2 \cdot xk0^2 + K_1 \cdot xk0 + K_0 \quad yk0 = 177.937 \quad bk0 := yk0 - \frac{xk0}{\tan(\alpha r)}$$

$$bk0 = -133.823 \quad xx1 := 0, 1 .. x1 \quad zz := |b1 - bk0|$$

$$F10(xx1) := \frac{xx1}{\tan(\alpha r)} + bk0 \quad F11(xx1) := \frac{xx1}{\tan(\alpha r)} + b1 \quad zz = 39.383$$

$$h1 := zz \cdot \sin(\alpha r) \quad h1 = 34.106 \quad F12(x) := K_2 \cdot x^2 + K_1 \cdot x + K_0$$

Для определения площади обратного хода рабочего органа находим координаты точки пересечения касательной к штамбу под начальным углом установки  $\alpha^1$  и аппроксимированной функцией уравнения движения обратного хода рабочего органа т. Р(xk1, yk1), см.рис 5.

$$F13(x) := \frac{x}{\tan(\alpha r)} + b1 \quad F14(x) := F12(x) - F13(x) \quad x := 700$$

$$xk1 := \text{root}(F14(x), x) \quad yk1 := \frac{xk1}{\tan(\alpha r)} + b1$$

$$yk1 = 201.598 \quad xk1 = 649.178$$

Площадь обратного хода определяется по формуле (6) - площадь ограниченная дугой АМР и касательной АР, см. рис 5.

$$S2 := \int_{xk1}^{x1} (K_2 \cdot x^2 + K_1 \cdot x + K_0) dx - \int_{xk1}^{x1} \left( \frac{x}{\tan(\alpha r)} + b1 \right) dx \quad (6)$$

$$S1 := L \cdot h1 \quad S3 := S1 + S2$$

$$S1 = 25598.655 \quad S2 = -0.244 \quad S3 = 25598.41$$

где: S2 - площадь обратного хода рабочего органа, мм\*мм;  
 S1 - площадь зоны обратного хода, мм\*мм;  
 S3 - сумарная площадь, мм\*мм.

Приложение 5

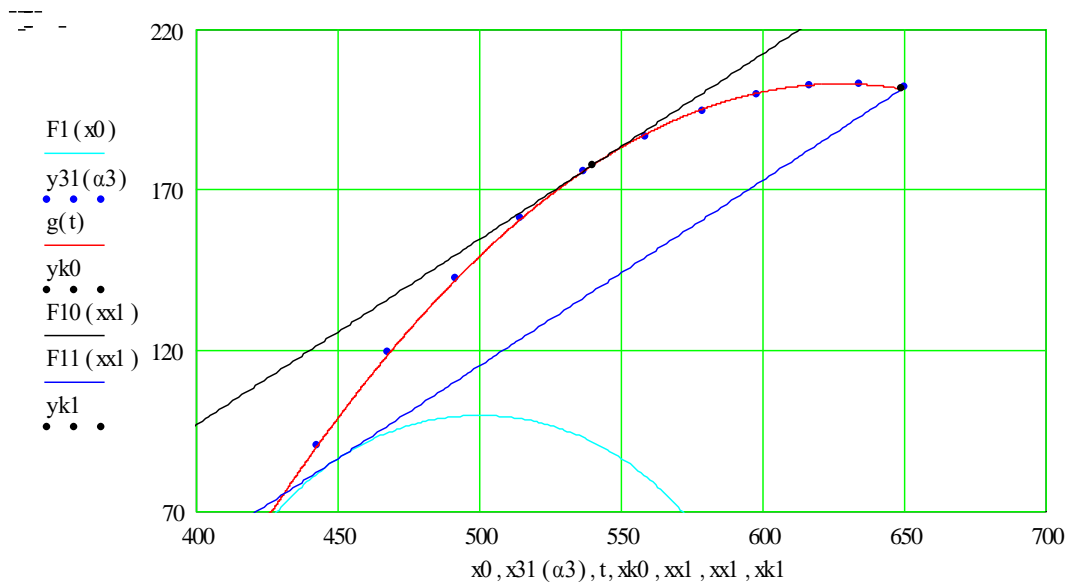


Рисунок П4.5 Определение площади двукратной обработки при обратном ходе рабочего органа

Во время обхода штамба рабочий орган устанавливается под углом  $\alpha_2$ , после которого срабатывает узел раскрыва или узел установки рабочего органа в начальный угол  $\alpha$ . Для нахождения угла раскрыва  $\alpha_2$  см. рис.6, определим все геометрические параметры в точках  $A(y_4, x_4)$  и  $A_n(y_n, x_n)$ .

$$y_4 := H \cdot \frac{L}{(R + L)} \quad \sin \alpha_2 := \frac{H}{R + L} \quad y_n := L \cdot \sin(\alpha r)$$

$$y_4 = 441.215 \quad \sin \alpha_2 = 0.588 \quad y_n = 650$$

$$\alpha_{2r} := \arcsin(\sin \alpha_2) \quad \alpha_2 := \alpha_{2r} \cdot \frac{180}{\pi} \quad x_4 := -R \cdot \cos(\alpha_{2r})$$

$$\alpha_{2r} = 0.628 \quad \alpha_2 = 36.005 \quad x_4 = -80.897$$

$$x_n := -((R + L) \cdot \cos(\alpha_{2r}) - L \cdot \cos(\alpha r)) \quad \beta := \alpha - \alpha_2$$

$$x_n = -312.795 \quad \beta = 23.995$$

$$\beta_r := \beta \cdot \frac{\pi}{180} \quad X := -(R + L) \cdot \cos(\alpha_{2r})$$

$$\beta_r = 0.419 \quad X = -688.073 \quad x_{n1} := x_n, x_n - 0.1 \dots X$$

- - - Для построения рисунка 6 проводим дополнительные расчеты при построении в среде Mathcad - 2000.

$$x_{41} := x_4, x_4 - 0.1 .. X \quad y_{41}(x_{41}) := \frac{(y_4 \cdot X - x_{41} \cdot y_4)}{X - x_4} \quad y_5(x_{n1}) := \frac{(y_n \cdot X - x_{n1} \cdot y_n)}{X - x_n}$$

$$\beta_1 := 0, 0.001 .. \beta_r \quad y_6(\beta_1) := -(R \cdot \cos(\alpha_2 r) + L \cdot \cos(\alpha_2 r) - L \cdot \cos(\alpha_2 r + \beta_1)) \quad (7)$$

$$x_6(\beta_1) := L \cdot \sin(\alpha_2 r + \beta_1) \quad (8)$$

$$x_{03} := y_4, y_4 + 0.1 .. H \quad F_{15}(x_{03}) := \left( \frac{x_{03} - H}{y_4 - H} \right) \cdot x_4$$

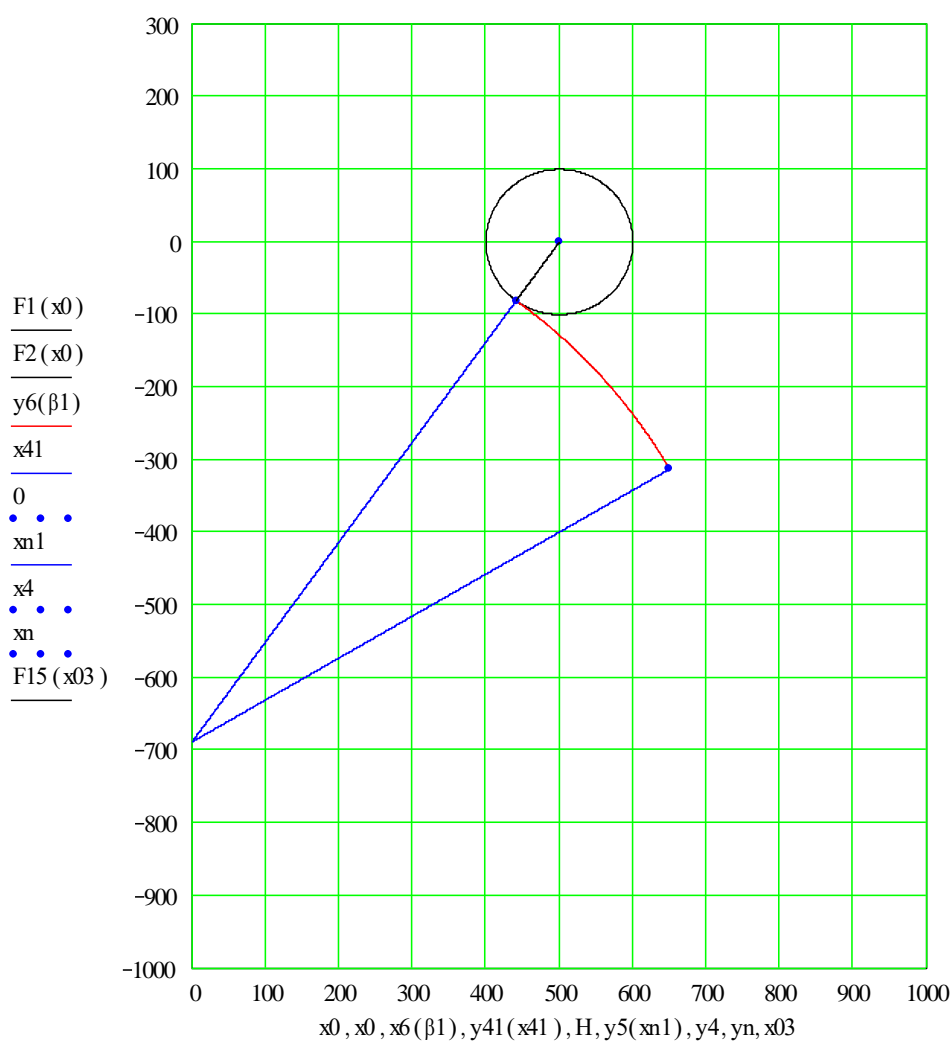


Рисунок П4.6 Определение угла раскрытия -  $\beta$  и угла  $\alpha_2$  - выхода рабочего органа из зоны скольжения по штамбу.

Приложение 5



$\text{tr} = \frac{Sp - (L + R) \cdot \cos(\alpha_2 r) + L \cdot \cos(\alpha r)}{Vp \cdot 1000}$

$$Sp = 400 \quad L = 750.555 \quad R = 100 \quad Vp = 1.389$$

$$\text{tr} = \frac{Sp - (L + R) \cdot \cos(\alpha_2 r) + L \cdot \cos(\alpha r)}{Vp \cdot 1000} \quad \text{tr} = 0.063$$

где : tr - время установки рабочего органа от угла  $\alpha_2$  до начального угла  $\alpha$ , сек.

При движении рабочего органа от т.А до т.Ап, промежуточные значения т.Аi совершают движение по дуге с радиусом L, одновременно двигаясь со скоростью трактора по пути следования агрегата см. рис.7 за время tr.

Добавим в уравнения траектории движения т.А, формулы (7) и (8) составляющие влияния скорости движения агрегата и времени установки рабочего органа до начального угла, после обхода штамба. Получим уравнения (9) и (10).

Разобьём весь путь следования на 10 частей т.е. получим 11 точек для дальнейшей оппроксимации и получения функции при движении от т.А до т.Ап.

Строим точки траектории движения и аппроксимируем эти точки сплайн-аппроксимацией. При ней исходная функция заменена отрезками полиномов, проходящих через три смежных узловых точки. Коэффициенты полиномов рассчитываются так, чтобы непрерывными были первая и вторая производные.

Линия, которую описывает сплайн-функция, напоминает по форме гибкую линейку, закреплённую в узловых точках ( откуда и название аппроксимации: spline- гибкая линейка ).

Применяя кубический сплайн, cspline(XA,YA), строим траекторию движения т.А см. рис.7.

$$nn = 10 \quad kkk = \frac{\beta r}{nn} \quad kkk = 0.042 \quad d\beta = 0, kkk \cdot \beta r$$

$$x61(d\beta) = L \cdot \sin(\alpha_2 r + d\beta) \quad (9)$$

$$y61(d\beta) = -((R + L) \cdot \cos(\alpha_2 r) - L \cdot \cos(\alpha_2 r + d\beta)) - \frac{d\beta \cdot Vp \cdot tr \cdot 1000}{kkk \cdot nn} \quad (10)$$

$$xn1 = -((R + L) \cdot \cos(\alpha_2 r) - L \cdot \cos(\alpha r)) - Vp \cdot tr \cdot 1000$$

$$XX = X - Vp \cdot tr \cdot 1000$$

$$xn11 = xn1, xn1 - 0.1 \dots XX$$

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{l}
 \text{---} \\
 \text{---} \\
 \text{---} \\
 \text{---} \\
 \text{---} \\
 \text{---} \\
 \text{---} \\
 \text{---} \\
 \text{---} \\
 \text{---} \\
 \text{---}
 \end{array} \\
 \begin{array}{l}
 y61(0:kkk) \quad x61(0:kkk) \\
 y61(1:kkk) \quad x61(1:kkk) \\
 y61(2:kkk) \quad x61(2:kkk) \\
 y61(3:kkk) \quad x61(3:kkk) \\
 y61(4:kkk) \quad x61(4:kkk) \\
 \text{data} := y61(5:kkk) \quad x61(5:kkk) \\
 y61(6:kkk) \quad x61(6:kkk) \\
 y61(7:kkk) \quad x61(7:kkk) \\
 y61(8:kkk) \quad x61(8:kkk) \\
 y61(9:kkk) \quad x61(9:kkk) \\
 y61(10:kkk) \quad x61(10:kkk)
 \end{array}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 y51(xn11) := \frac{yn \cdot XX - xn11 \cdot yn}{XX - xn11} \\
 \\
 \text{data} := \text{csort}(\text{data}, 0) \quad \text{XA} := \text{data}^{<0>} \\
 \\
 \text{YA} := \text{data}^{<1>} \quad \text{SC} := \text{cspline}(\text{XA}, \text{YA}) \\
 \\
 \text{fits}(x) := \text{interp}(\text{SC}, \text{XA}, \text{YA}, x)
 \end{array}$$

$$\text{scale} := 1000 \quad j := 0.. \text{scale} \quad y4 = 441.215 \quad x4 = -80.897$$

$$x_j := \min(\text{XA}) + j \cdot \frac{\max(\text{XA}) - \min(\text{XA})}{\text{scale}} \quad yn = 650$$

Определим площадь SSp между дугой A-An и направлением движения агрегата по формуле 11.

$$\text{SSp} := \int_{\min(\text{XA})}^{\max(\text{XA})} \text{fits}(x) \, dx \quad \text{SSp} = 178231 \quad (11)$$

Площадь Sp зоны раскрыва ВАAnВп см. рис.7 определяется по формуле 12.

$$\text{Sp} := \text{SSp} + L \cdot \cos(\alpha r) \cdot \frac{yn}{2} - L \cdot \cos(\alpha 2r) \cdot \frac{y4}{2} \quad \text{Sp} = 166249 \quad (12)$$

$$x_{ko} := H - \frac{zP}{2}, H - \frac{zP}{2} + 1.. 2 \cdot H \quad x_{ko1} := H - \frac{zP}{2}$$

Уравнение касательной АоВо описуется формулой 13.

$$\text{F33}(x_{ko}) := \frac{x_{ko}}{\tan(\alpha r)} + b1 - \frac{D}{\sin(\alpha r)} \quad (13)$$

Приложение 5

--  $\Xi$  -- Точка касания Do(x1ko,y1ko) при обратном ходе агрегата описуется формулами 14 и 15 см. рис.7.

$$x1ko := x1k + D \cdot \cos(\alpha r) \quad x1ko = 550 \quad (14)$$

$$y1ko := y1k - D \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha r\right) \quad y1ko = -86.603 \quad (15)$$

Определяем координаты точки W(tp,tpy)-пересечения касательной AoBo, обратного хода рабочего органа с дугой AAn - траекторией движения рабочего органа при движении в прямом направлении при обходе штамба.

Решая совместно два уравнения: касательной AoBo и дуги AAn по функции root - значение переменной xx при котором, выражение F40(xx) равно нулю.

$$\text{data1} := \begin{bmatrix} y61(0 \cdot kkk) & x61(0 \cdot kkk) \\ y61(1 \cdot kkk) & x61(1 \cdot kkk) \\ y61(2 \cdot kkk) & x61(2 \cdot kkk) \\ y61(3 \cdot kkk) & x61(3 \cdot kkk) \\ y61(4 \cdot kkk) & x61(4 \cdot kkk) \\ y61(5 \cdot kkk) & x61(5 \cdot kkk) \\ y61(6 \cdot kkk) & x61(6 \cdot kkk) \\ y61(7 \cdot kkk) & x61(7 \cdot kkk) \\ y61(8 \cdot kkk) & x61(8 \cdot kkk) \\ y61(9 \cdot kkk) & x61(9 \cdot kkk) \\ y61(10 \cdot kkk) & x61(10 \cdot kkk) \end{bmatrix} \quad \text{data1} := \text{csort}(\text{data}, 1)$$

$$YAA := \text{data1}^{<0>} \quad XAA := \text{data1}^{<1>}$$

$$SCA := \text{cspline}(XAA, YAA)$$

$$\text{fits1}(x) := \text{interp}(SCA, XAA, YAA, x) \quad \text{pr} := 0, -0.1 \dots \text{xn1}$$

$$\text{er}(x) := \frac{x}{\tan(\alpha r)} + b1 - \frac{D}{\sin(\alpha r)} \quad F40(x) := \text{fits1}(x) - \text{er}(x) \quad \text{xx} := 800$$

$$\text{tp} := \text{root}(F40(\text{xx}), \text{xx}) \quad \text{tp} = 481.305 \quad \text{tpy} := \text{fits1}(\text{tp}) \quad \text{tpy} = -126.264$$

Приложение 5

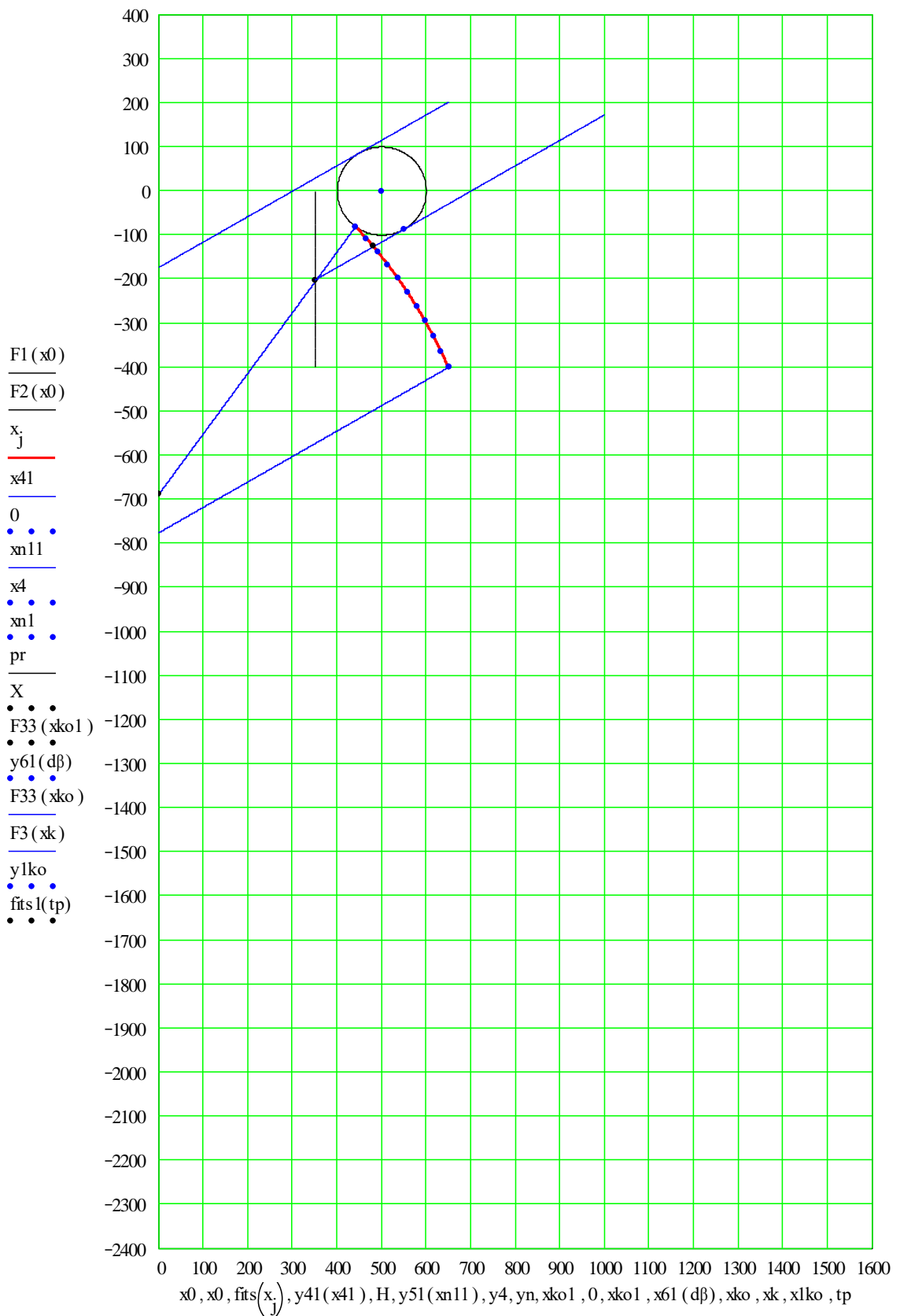


Рисунок П4.7 Не обрабатываемая площадь

Определим не обрабатываемую площадь  $S_{n1}$ , после выхода рабочего органа из зоны скольжения по штамбу, по формуле 16.

$$S_{n1} := \begin{cases} \int_{y4}^{H - \frac{zP}{2}} fits1(x) + \sqrt{R^2 - (x - H)^2} dx & \text{if } tp < H - \frac{zP}{2} \\ \int_{y4}^{tp} fits1(x) + \sqrt{R^2 - (x - H)^2} dx & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

$$S_{n1} = -474.27 \quad S_{n1} := |S_{n1}| \quad S_{n1} = 474.27$$

При прямом ходе рабочий орган подходит к штамбу касаясь его, образуя не обрабатываемую зону  $S_4$ , определяемую по формуле 17.

$$S_4 := \begin{cases} \int_{H - \frac{zP}{2}}^{H + R \cdot \cos(ar)} er(x) + \sqrt{R^2 - (x - H)^2} dx & \text{if } tp < H - \frac{zP}{2} \\ \int_{tp}^{H + R \cdot \cos(ar)} er(x) + \sqrt{R^2 - (x - H)^2} dx & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

$$S_4 = -669.807 \quad S_4 := |S_4| \quad S_4 = 669.807$$

Определим сумарную не обрабатываемую площадь  $S_{nz}$ , по формуле 18.

$$S_{nz} := S_4 + S_{n1} \quad (18)$$

$$S_{n1} = 474.27 \quad S_4 = 669.807 \quad S_{nz} = 1144.078$$

Определим зону двух кратной обработки  $S_{p2}$ , после выхода рабочего органа из зоны скольжения по штамбу, по формуле 19.

$t.R(H - zP/2, tpy)$  - точка пересечения дуги раскрыва с зоной перекрытия.

Определим координаты - пределы интегрирования.

$$tpy := fits1\left(H - \frac{zP}{2}\right) \quad tpy = 6.646 \quad tpy = -126.264$$

Приложение 5

$$Sp2 := \begin{cases} \int_{xn1}^{tppy} fits(x) dx - \left(H - \frac{zp}{2}\right) \cdot (tppy - xn1) & \text{if } tpy < H - \frac{zp}{2} \\ \int_{xn1}^{tpy} fits(x) dx - \left[ \frac{\left(tp - H + \frac{zp}{2}\right)^2 \cdot \tan(\alpha r)}{2} \right] - \left(H - \frac{zp}{2}\right) \cdot (tpy - xn1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

$$Sp2 = 46549.149 \quad xn1 = -400 \quad tpy = 481.305 \quad H - \frac{zp}{2} = 350$$

Определим общую зону обработки  $So$  по формуле 20.

$$So := S \cdot 2 \cdot H - \pi \cdot R^2 \quad So = 2968584.073 \quad (20)$$

Определим сумарную зону двух кратной обработки  $Sop$ , по формуле 21.

$$Sop := (S2 + Sp2) \cdot 2 \quad Sop = 93097.809 \quad \frac{Sop}{So} \cdot 100 = 3.136 \quad (21)$$

Определим сумарную зону не обработанной поверхности  $Sono$ , по формуле 22.

$$Sono := (S4 + Sn1) \cdot 2 \quad Sono = 2288.155 \quad \frac{Sono}{So} \cdot 100 = 0.077 \quad (22)$$

$$\alpha = 60 \quad S = 3000 \quad D = 200$$

Научное издание

Г.Г. МАСЛОВ, Е.И. ТРУБИЛИН, В.В. ЦЫБУЛЕВСКИЙ

МОДЕЛИРОВАНИЕ В АГРОИНЖЕНЕРИИ

Учебное пособие

Подписано в печать 20.10.2019 Формат 60\*54/16

Тираж 500 экз. Усл.печ.л. – 33. Уч.- изд. Л. 15,9

Заказ №

Отпечатано в типографии КубГАУ

350044, Краснодар, ул. Калинина 13

КубГАУ