



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Управление качеством»

Методические указания
для выполнения практической работы
«Планирование экспериментов. Выбор
факторов»
по дисциплине

**«Основы теории экспери-
мента»**



Автор
Зубрилина Е. М.,
Димитров В. П.

Ростов-на-Дону, 2018

Аннотация

Методические указания предназначены для проведения практических работ с магистрантами очной формы обучения направления 27.04.02 «Управление качеством», изучающими дисциплину «Основы теории эксперимента».

Авторы

к.т.н, доцент кафедры «Управление качеством» Зубрилина Е.М.,
д.т.н., профессор кафедры «Управление качеством» Димитров В.П.





Оглавление

1. Общие положения	4
2. порядок выполнения работы	14
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	19

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – приобретение магистрантами компетенций по выбору факторов, их уровней варьирования и нулевой точки.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения с требуемой точностью и достоверностью поставленной задачи.

Планирование эксперимента – область знания, связанная с построением и оптимизацией математических моделей.

При планировании эксперимента исследуемый объект представляется «черным ящиком» (рис. 1), на который воздействуют факторы x_i ($1 \leq i \leq n$).

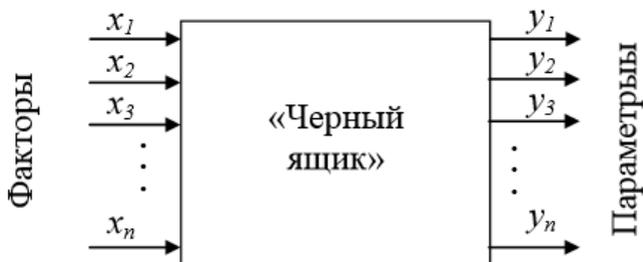


Рис. 1. Схема представления объекта исследований в виде «черного ящика»

В ходе выполнения эксперимента получаем математическую модель исследования, которая представляет собой уравнение, связывающее параметр оптимизации ($y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$) с факторами ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$), называемое уравнением регрессии:

$$y = b_0 x_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i,j=1}^k b_{i,j} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i,j,n=1}^k b_{i,j,k} x_i x_j x_n + \dots \quad (1)$$

где k – число столбцов в матрице планирования эксперимента; $x_0 = 1$.

Зависимость реакции объекта от точки факторного пространства называется *функцией отклика* $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, а ее геометрическое представление – поверхностью отклика (рис. 2).

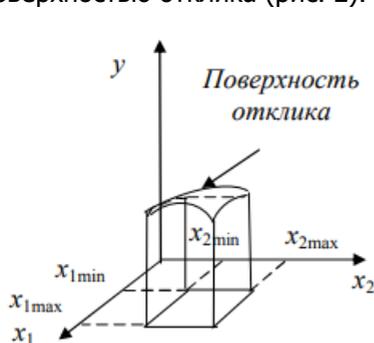


Рис. 2. Поверхность отклика

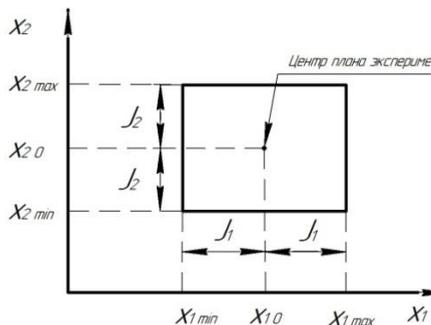


Рис. 3. Область определения факторов (при плане 2^2)

Выбор факторов завершается составлением списка всех факторов, оказывающих влияние на параметр оптимизации. При этом указываются наименования и обозначения факторов, их интервалы и уровни варьирования, координаты нулевой точки. Перечисленные данные фиксируются в таблицах.

Фактор (x_i) - управляемая независимая переменная, соответствующая одному из возможных способов воздействия на объект исследования.

Множество возможных значений фактора x_i называется *областью его определения (факторным пространством)* (рис. 3).

Факторы должны быть *управляемыми, совместимыми и независимыми*.

Требования к исследуемым параметрам:

- *эффективность*, то есть способствовать скорейшему достижению цели;

- *универсальность* – быть характерными не только для исследуемого объекта;

Основы теории эксперимента

- *статистическая однородность*, то есть определенному набору значений факторов x_i с точностью до погрешности эксперимента должно соответствовать определенное значение фактора y_i ;

- *выражаться количественно одним числом;*
- *легко вычисляться и иметь физический смысл;*
- *существовать при любом состоянии объекта.*

Для любого фактора x_i существует нулевой (средний), нижний x_{imin} и верхний x_{imax} уровни изменения значений.

Уровни фактора - выбранные для эксперимента количественные и качественные состояния фактора.

Под интервалом варьирования J_i подразумевается разность между двумя именованными его значениями, принятая за единицу при его кодировании.

Интервал варьирования определяется по формуле

$$J_i = \frac{x_{imax} - x_{imin}}{2} . \quad (2)$$

Верхний и нижний уровни факторов получают путем прибавления и вычитания из исходного уровня интервала варьирования.

Нулевой или средний уровень фактора (нулевая точка или центр эксперимента):

$$x_{i0} = \frac{x_{imax} + x_{imin}}{2} , \quad (3)$$

где x_{imin} , x_{imax} , x_{i0} – соответственно нижний, основной (нулевой) и верхний уровни i -го фактора.

Характеристики объектов экспериментальных исследований имеют различную физическую природу, а следовательно, и размерность, что затрудняет построения модели. Поэтому на практике значения факторов, которые имеют реальный физический смысл, нормируют (приводят к определенному ранее заданному набору значений). В планировании эксперимента значения факторов, соответствующие определенным уровням их варьирования, выражаются в кодированных величинах: +1 (верхний), -1 (нижний), основной – 0 (средний).

Основы теории эксперимента

При планировании эксперимента преобразуют размерные управляемые независимые факторы X_i в безразмерные, нормированные $x_{iн}$.

Алгоритм нормировки фактора:

- выбираем масштаб и положение осей координат таким образом, чтобы $x_{i\min}$ соответствовало -1 , а $x_{i\max}$ $+1$;
- вычисляем значение X_{i0} для данного фактора (по формуле (2));
- вычисляем интервал изменения i -го фактора J_i (по формуле (1)).
- находим нормированное (кодовое) значение $x_{iн}$ для каждого i -го фактора по формуле

$$x_{iн} = \frac{x_i - x_{i0}}{J_i} \quad (4)$$

Графически переход от натуральных значений факторов к нормированным означает перенос осей координат факторного пространства в исходный уровень (рис. 4).

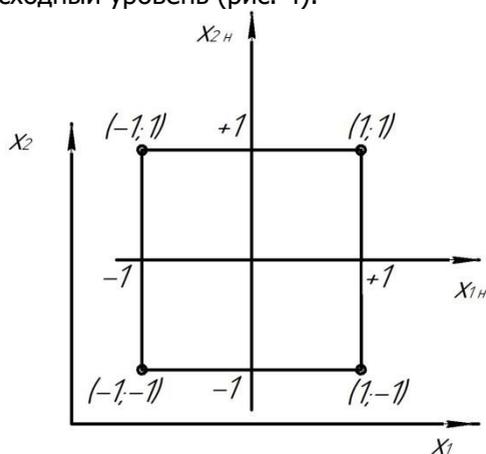


Рис. 4. Перенос осей координат факторного пространства в исходный уровень

ПРИМЕР. Предложенную выше методику выбора факторов и их уровней рассмотрим на примере исследований пневматического аппарата для одновременного высева семян кукурузы и сорго в один рядок (рис. 5).

Цель исследований – обоснование функциональной схемы, параметров и режимов работы пневматического аппарата для одновременного высева семян кукурузы и сорго в один рядок с заданными нормой и распределением по площади посева.

Объект исследований – технологический процесс одновременного высева семян двух культур аппаратом пневматического действия.

Предмет исследования – параметры и режимы работы высевающего аппарата для одновременного высева семян двух культур, закономерности и характеристики их влияния на объект исследования.

Рабочая гипотеза – процесс одновременного высева семян кукурузы и сорго в один рядок, возможно осуществить высевающим аппаратом серийной сеялки СУПН-8 за счет расширения функциональных возможностей на основе совершенствования его конструкции.

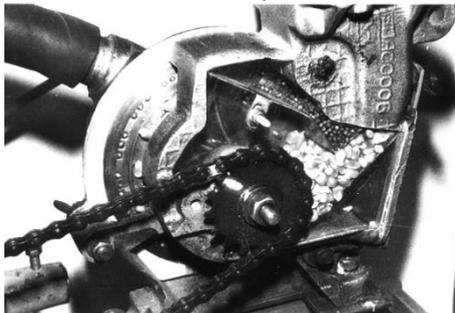
Поскольку в экспериментальном высевающем аппарате (см. рис. 5) происходит два самостоятельных процесса высева семян двух культур, в которых некоторые факторы являются общими для обоих процессов, то при ранжировании факторов они были разделены на три группы:

- факторы, влияющие только на процесс высева семян кукурузы;
- факторы, влияющие только на процесс высева семян сорго;
- факторы, общие для обоих процессов.

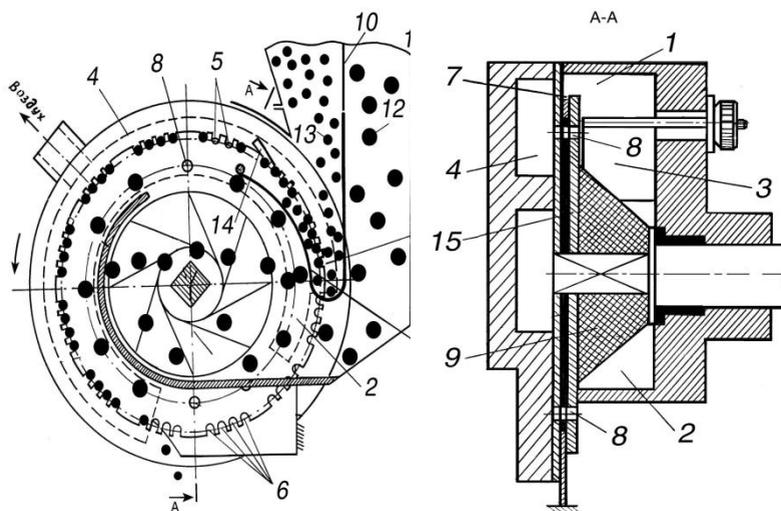
Факторами, влияющими на процесс высева семян кукурузы, являются: x_3 - положение подвижной части перегородки камер, выполняющей функции сбрасывателя "лишних" семян; x_4 - количество присасывающих отверстий на высевающем диске; x_5 - диаметр присасывающих отверстий; x_6 - радиусы удаления присасывающих отверстий от центра высевающего диска; x_7 - толщина диска; x_8 - конструктивный вариант ворошилки семян; x_9 - угол

Основы теории эксперимента

наклона дна семенной камеры; x_{10} - расстояние от перегородки семенных камер до дна семенной камеры.



а)



б)

Рис. 5. Экспериментальный высевной аппарат для совместного высева семян кукурузы и сорго в один рядок: а – фото экспериментального аппарата; б – схема экспериментального высевного аппарата: 1 - семенная камера для семян сорго; 2 - семенная камера для семян кукурузы; 3 - перегородка; 4 - вакуумная камера; 5 - просасывающие отверстия; 6 - вырезы; 7 - присасывающая щель; 8 - отверстия; 9 - ворошилка; 10 - перегородка; 11 - семенной ящик; 12 - семена кукурузы; 13 - семена сорго; 14 - отгиб сбрасывателя лишних семян; 15 - накладка диска

Факторами, влияющими на процесс высева семян сорго, являются: x_3 - ширина перемычки между отверстиями пульсатора, выполняющего функции сбрасывателя "лишних" семян; x_4 - число отверстий пульсатора; x_5 - диаметр отверстий пульсатора; x_6 - положение сбрасывающего отгиба пульсатора; x_7 - длина окна активного присасывания семян; x_8 - ширина окна присасывания семян; x_9 - радиус удаления отверстий пульсатора и окна присасывания от центра высевающего диска; x_{10} - число высевающих ячеек и просасывающих отверстий в основании диска; x_{11}, x_{12} - ширина и высота высевающей ячейки; x_{13} - ширина щели высевающего диска; x_{14}, x_{15} - радиусы удаления центров просасывающих отверстий и высевающих ячеек от центра диска; x_{16} - положение дна семенной камеры по отношению к дну корпуса аппарата; x_{17} - высота загрузочного окна; x_{18} - диаметр просасывающих отверстий; x_{19} - диаметр щелеобразующей прокладки диска; x_{20} - ширина чистика щели; x_{21}, x_{22}, x_{23} - толщины основания диска, щелеобразующей прокладки и накладки диска.

Общими факторами для обоих процессов являются: x_1 - частота вращения высевающего диска; x_2 - величина разрежения в вакуумной камере аппарата.

В составе факторов, влияющих на процесс высева семян кукурузы: фактор x_4 был определен технологическим расчетом и в ходе экспериментов не менялся; x_5 был принят по аналогии с серийным аппаратом сеялки СУПН-8; x_6, x_7 - определены конструктивным путем и в ходе экспериментов были неизменны; факторы x_8, x_9, x_{10} были определены в результате предварительных исследований и не вошли в число варьируемых факторов.

Таким образом, в состав варьируемых факторов вошли: x_1, x_2 и x_3 . Выбор уровней и интервалов варьирования указанных

факторов производился с учетом реальных условий эксплуатации и результатов теоретических и предварительных исследований.

Диапазон варьирования фактора x_1 определен технологическим расчетом и составил 2...4 рад/с. В соответствии с этим за основной (нулевой) уровень фактора x_1 было принято значение 3 рад/с, а интервал варьирования составил 1 рад/с.

Основной (нулевой) уровень фактора x_2 был определен исходя из технической характеристики сеялки СУПН-8 (3,2 кПа). С учетом некоторого понижения вакуума, связанного с изменением конструкции высевающего диска, нулевой уровень фактора x_2 для экспериментального аппарата составил 3,0 кПа. Нижний уровень был определен по результатам теоретических исследований и составил 2,0 кПа. Таким образом, интервал варьирования фактора x_2 составил 1,0 кПа, а его верхний уровень – 4,0 кПа.

Уровни варьирования фактора x_3 были определены из опыта эксплуатации приспособления "Аргос-1", по принципу действия которого и работает сбрасыватель "лишних" семян в экспериментальном аппарате. Наиболее оптимальным (нулевым) считается положение сбрасывателя, когда его поверхность касается окружности присасывающего отверстия высевающего диска. В зависимости от размеров высеваемых семян сбрасыватель может менять свое положение относительно среднего (нулевого) на величину $\pm \frac{1}{3} d_{омс}$. При $d_{омс} = 5$ мм это отклонение составляет $\pm 1,7$

мм. Для лабораторных исследований интервал был принят 1,5 мм.

Факторы, влияющие на процесс высева семян сорго: факторы $x_9, x_{14}, x_{15}, x_{19}, x_{20}$ были определены конструктивным путем и в процессе исследований не менялись; факторы $x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{18}, x_{21}, x_{22}, x_{23}$ были приняты по рекомендации Бондаренко П.А. и в процессе исследований также не менялись; фактор x_{17} был принят по аналогии с аппаратом сеялки СУПН-8; фактор x_{10} определен технологическим расчетом; факторы x_7, x_8, x_{16} были оптимизированы в результате предварительных экспериментальных исследований и в дальнейшем не менялись.

Основы теории эксперимента

Факторы x_3, x_4, x_5, x_6 являются элементами пульсатора разрежения и взаимосвязаны между собой. В качестве варьируемого фактора был принят фактор x_3 , который в основном определяет работу пульсатора, а соответственно, и качество удаления "лишних" семян сорго. Экспериментально установлено, что в зависимости от необходимости увеличения или уменьшения присасывающей силы x_3 может принимать значения

$$0,4d_c < x_3 < 0,8d_c,$$

где d_c - диаметр просасывающего отверстия основания диска.

Для исследуемого аппарата при $d_c = 3$ мм уровни варьирования x_3 составили: $x_{(0)} = 1,8$ мм, $x_{(+1)} = 2,4$ мм, $x_{(-1)} = 1,2$ мм. Интервал варьирования - 0,6 мм.

Факторы x_1, x_2 включены в состав варьируемых факторов как совместные, с теми же уровнями и интервалами, что и для процесса высева семян кукурузы.

Результаты подготовительной работы по выбору основных факторов, уровней и интервалов их варьирования сведены в табл. 1.

Таблица 1 - Основные факторы и уровни их варьирования (пример)

Наименование процесса	Наименование фактора	Обозначение	Уровни факторов			Интервал варьирования
			основной (0)	нижний (-1)	верхний (+1)	
Высев семян кукурузы	ω_{δ} - угловая скорость вращения высевающего диска, рад/с	x_1	3	2	4	1
	p - величина разрежения в вакуумной камере высевающего аппарата, кПа	x_2	3	2	4	1
	Z - зазор между перегородкой и присасывающим отверстием, мм	x_3	0	-1,5	+1,5	1,5
Высев семян сорго	ω_{δ} - угловая скорость вращения высевающего диска, рад/с	x_1	3	2	4	1
	p - величина разрежения в вакуумной камере высевающего аппарата, кПа	x_2	3	2	4	1
	δ_n - ширина перемычки между отверстиями пульсатора, мм	x_3	1,8	1,2	2,4	0,6

С целью определения характеристик работы экспериментального аппарата и рациональных режимов его эксплуатации в диапазоне реальных рабочих скоростей посевного агрегата был проведен трехфакторный эксперимент с использованием некомпозиционного трехуровневого плана второго порядка Бокса-Бенкина и получены модели процесса высева семян кукурузы и сорго, уравнения регрессии которых характеризуют зависимость y_k и y_c от факторов x_1, x_2 и x_3 :

$$y_k = 1,0050 - 0,0256x_1 + 0,0881x_2 + 0,0137x_3 - 0,0008x_1x_2 + 0,0013x_1x_3 + 0,0188x_2x_3 - 0,0354x_1^2 - 0,0329x_2^2 - 0,0042x_3^2; \quad (6)$$

$$y_c = 1,0020 - 0,0355x_1 + 0,0587x_2 - 0,0161x_3 - 0,0083x_1x_2 - 0,0079x_1x_3 + 0,0080x_2x_3 - 0,0135x_1^2 + 0,0093x_2^2 - 0,0064x_3^2. \quad (7)$$

Кодированные значения факторов заменяем натуральными (переводим их по формуле (4)).

ПРИМЕР.

$$v_{k3} = 0,6315 + 0,0770 v_g - 0,9983 l_3 + 0,6408 v_g \cdot l_3 - 0,0012 v_g^2 - 13,0625 l_3^2 + 0,0136 \omega^2$$

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Определить цель, объект и предмет экспериментальных исследований, условия и последовательность работы экспериментального высевающего аппарата.

Цель эксперимента – повышение качества посева пропашных культур пневматическими сеялками путем установки семяпровода с автоматизированной системой контроля и управления качеством высева пропашных культур.

Объект исследования – экспериментальный пневматический высевающий аппарат с семяпроводом и автоматизированной системой контроля и управления качеством высева пропашных культур (рис. 6, позиции 3, 6, 9; рис. 7).



Рис. 6. Лабораторная установка для исследований пневматических высевающих аппаратов: 1 – рама, 2 – электродвигатель постоянного тока, 3 – приводная цепь, 4 – частотный преобразователь, 5 – экспериментальный высевающий аппарат, 6 – семяпровод, 7 – вакуумная установка с регулятором разрежения, 8 – компрессор, 9 – датчики измерения скорости семян на выходе из семяпровода, 10 – персональный компьютер.

Основы теории эксперимента

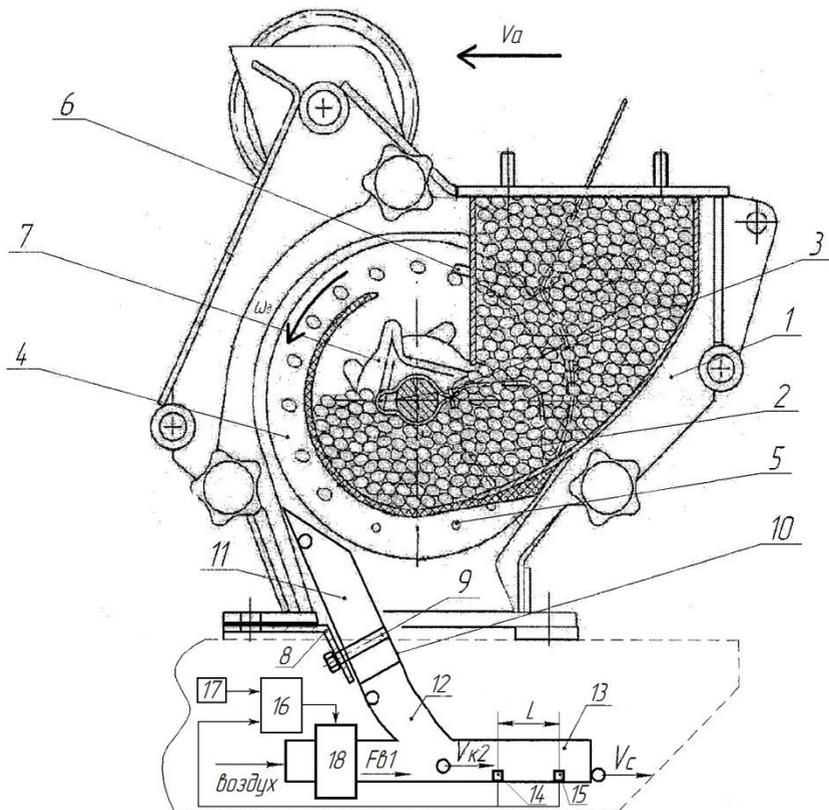


Рис. 7. Экспериментальный высевальной аппарат с автоматизированной системой контроля и управления высевом пропашных культур: 1 корпус; 2 - семенная камера; 3 - вал; 4 - высевальной диск; 5 - присасывающие отверстия; 6 - пластинчатый отражатель для удаления «лишних» семян; 7 - центральная резиновая воросилка; 8 - кронштейн; 9 - хомут; 10 - семяпровод, представляющий собой трубку круглого сечения и имеющий три участка: прямолинейный 11, криволинейный 12 и ускорительный 13; 14 - первый датчик; 15 - второй датчик; 16 - блок мониторинга и контроля; 17 - датчик скорости посевного агрегата; 18 - блок управления воздушным потоком (дрессельная заслонка, содержащая корпус, в котором размещен поворотный диск, соединенный с сервоприводом).

Основы теории эксперимента

Работа пневматического высевающего аппарата (рис. 7) осуществляется следующим образом: семена из бункера (на рисунке не показан) поступают в семенную камеру 2 корпуса 1 высевающего аппарата, из которой под действием разрежения, создаваемого в вакуумной камере (на рисунке не показана), присасываются к присасывающим отверстиям 5 высевающего диска 4. Вращаясь вместе с высевающим диском 4, семена из семенной камеры 2 переносятся к пластинчатому отражателю 6, под действием которого «лишние» присосавшиеся семена возвращаются обратно в семенную камеру 2.

Далее семена транспортируются высевающим диском 4 в зону сбрасывания. Сходящее с высевающего диска семя укладывается на внутреннюю поверхность семяпровода 10 на прямолинейном участке 11 и скользит по нему как по наклонной плоскости до криволинейного участка 12. На криволинейном участке 12 семя движется по криволинейной поверхности постоянного радиуса до тех пор, пока вектор скорости не приобретает горизонтальное направление. При выходе из криволинейного участка 12 семяпровода 10 со скоростью V_{k2} , семя продолжает движение по ускорительному участку 13, наращивая свою скорость за счет силы воздушного потока. Сила воздушного потока $F_{в1}$ на ускорительном участке 13 семяпровода определяется скоростью воздушного потока, изменение которого происходит за счёт блока управления воздушным потоком 18. На ускорительном участке 13 горизонтально движущееся семя с помощью воздушного потока разгоняется до скорости, равной по величине скорости посевного агрегата V_a . Регулировка воздушного потока осуществляется за счёт изменения угла открытия дроссельной заслонки, расположенной в начале ускорительного участка. При равенстве скорости семени и скорости посевного агрегата обеспечивается нулевая скорость семени относительно почвы, что приводит к повышению равномерности распределения семян по длине и ширине рядка при посеве различных пропашных культур. Значение скорости семени на ускорительном участке V_c определяется первым 14 и вторым 15 датчиками, скорость посевного агрегата V_a определяется датчиком 17. Данные значения поступают в блок мониторинга и контроля 16, в котором осуществляется сравнение скоростей и выработка управляющего воздействия для сервопривода дроссельной заслонки (блок управления воздушным потоком) 18.

2. *Определить параметр выхода (отклика).* В качестве выходного параметра (параметра отклика) экспериментального высевающего аппарата принимаем значение скорости семян на выходе

из семяпровода.

3. *Определить перечень факторов, влияющий на исследуемый процесс, дать их описание, характер влияния на исследуемый объект, методы и способы регулирования, измерения и т.д.*

4. *Выбрать нулевой уровень и интервалы варьирования каждого фактора и заполнить табл. 2.*

Таблица 2 - Основные факторы и уровни их варьирования

Объект исследования	Наименование фактора	Обозначение	Уровни факторов			Интервал варьирования
			нижний (-1)	основной (0)	верхний (+1)	
		x_1				
		x_2				
		x_n				

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубрилина, Е.М. Обоснование параметров пневматического аппарата для одновременного посева семян кукурузы: дис. ... канд. техн. наук. – зерноград, 2002.
2. Пат. № 175130 RU МПК 7A01 C7/04 . Пневматический посевающий аппарат / Е.М. Зубрилина, И.А. Маркво, М.А. Набокина, А.В. Каргина, М.Г. Бородаева, Патентообладатель И.А. Маркво, № 2016141247/13 ; заявл. 19.10.2016; опубл. 22.11.2017 Бюл. №33.
3. Тарасов, Р.В. К вопросу применения экспертных методов в прогнозировании процессов, оценке уровня качества и принятии управленческих решений / Р.В. Тарасов, Л.В. Макарова, О.Ф. Акжигитова // Современные научные исследования и инновации. – Апрель 2014. – № 4 [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2014/04/33142>.