

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА.  
ВЫБОР ФАКТОРОВ

ПРАКТИКУМ

Ростов-на-Дону  
2021

Составители: Е.М. Зубрилина, В.П. Димитров

УДК 001.891

Планирование эксперимента. Выбор факторов: практикум. – Ростов-на-Дону: ООО «ДГТУ-Принт», 2021. – 15 с.

В данном разделе практикума приводится методика выбора факторов, уровней их варьирования и нулевой точки. Представлены требования к факторам и приведены примеры выбора и описание факторов для проведения трехфакторного эксперимента по плану Бокса-Бенкина.

Практикум предназначен для проведения практических работ со студентами, изучающих дисциплину «Основы научных исследований», «Основы научных исследований в отрасли», «Основы научных исследований в АПК».

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Донского государственного технического университета

Научный редактор  
кандидат физико-математических наук,  
доцент И.Н. Нурутдинова

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

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

### 1. ОБЩИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

*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  $x_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ).

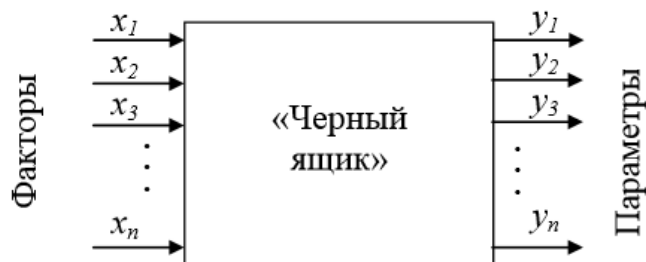


Рис. 1. Схема представления объекта исследований в виде «черного ящика»

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:

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

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).

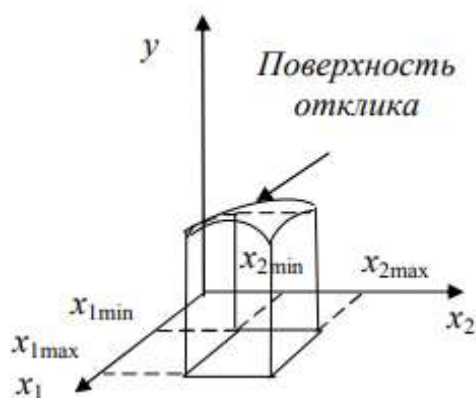


Рис. 2. Поверхность отклика

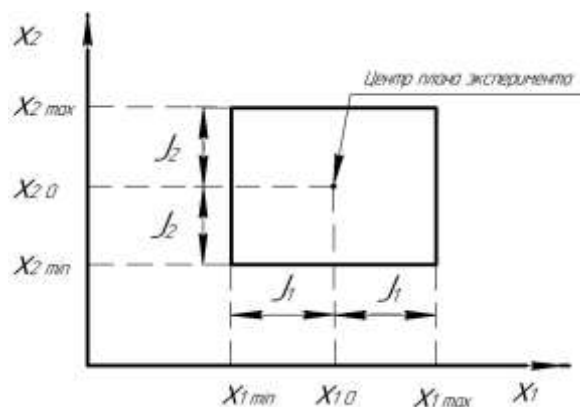


Рис. 3. Область определения факторов (при плане  $2^2$ )

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;

- *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  $x_{i\min}$  и верхний  $x_{i\max}$  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

$$J_i = \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{2} . \quad (2)$$

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):

$$x_{i0} = \frac{x_{i\max} + x_{i\min}}{2} , \quad (3)$$

где  $x_{i\min}$ ,  $x_{i\max}$ ,  $x_{i0}$  – 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).

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

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  $x_{in}$  для каждого  $i$ -го фактора по формуле

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

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

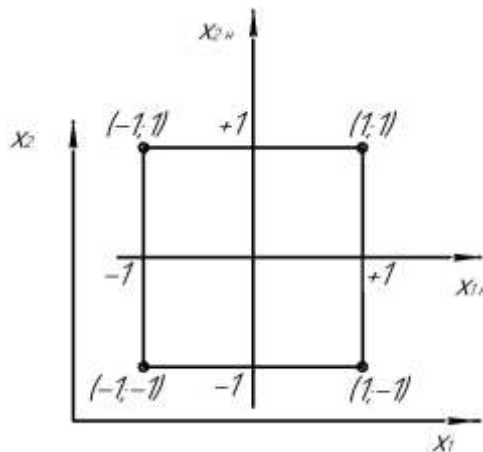


Рис. 4. Перенос осей координат факторного пространства в исходный уровень

**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.

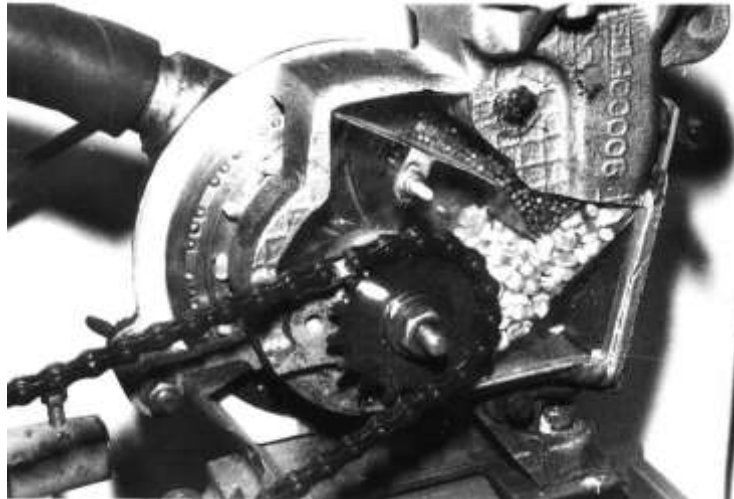
*Предмет исследования* – параметры и режимы работы высевящего аппарата для одновременного высева семян двух культур, закономерности и характеристики их влияния на объект исследования.

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

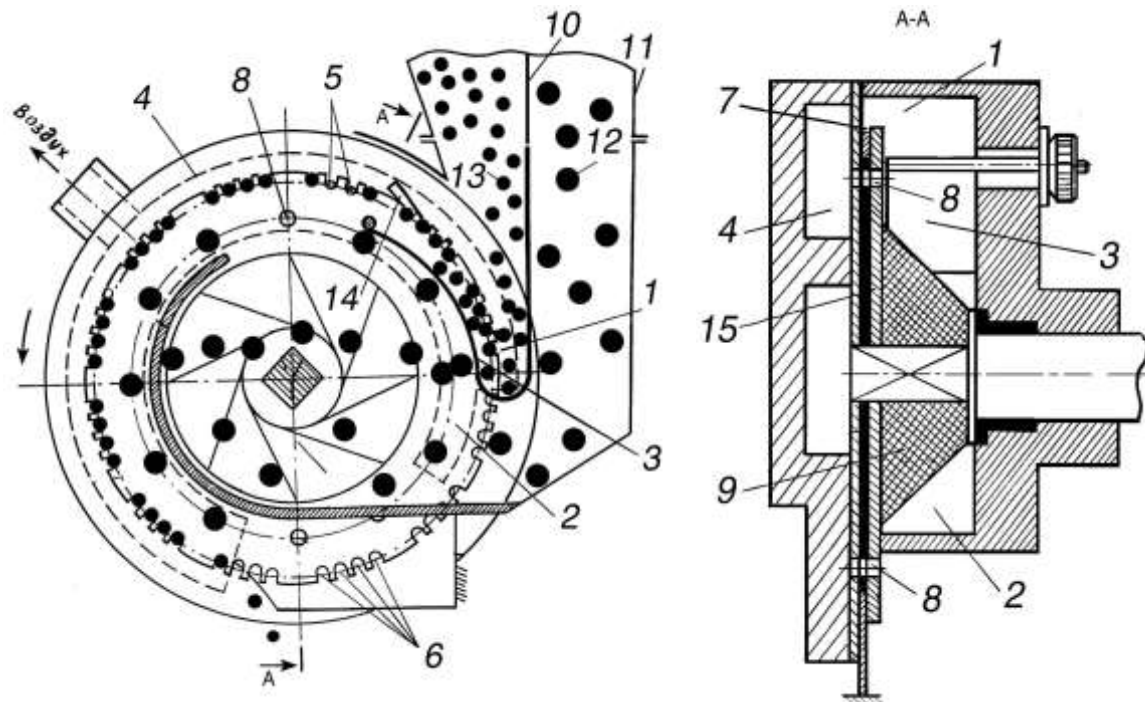
Поскольку в экспериментальном высевящем аппарате (см. рис. 5) происходит два самостоятельных процесса высева семян двух культур, в которых некоторые факторы являются общими для обоих процессов, то при ранжировании факторов они были разделены на три группы:

- 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 высевящем диске;  $x_5$  – диаметр присасывающих отверстий;  $x_6$  – радиусы удаления присасывающих отверстий от центра высевящего диска;  $x_7$  – толщина диска;  $x_8$  – конструктивный вариант ворошил-ки семян;  $x_9$  – угол наклона дна семенной камеры;  $x_{10}$  – расстояние от перегородки семенных камер до дна семенной камеры.



a)



б)

Рис. 5. Экспериментальный высевной аппарат для совместного посева 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 перемишки 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



$\pm \frac{1}{3} d_{отс}$ . При  $d_{отс} = 5$  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.

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	$\omega_\delta$ - 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	$\omega_\delta$ - 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
	$e_n$ - 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.*

$$v_{k3} = 0,6315 + 0,0770 v_6 - 0,9983 l_3 + 0,6408 v_6 \cdot l_3 - 0,0012 v_6^2 - 13,0625 l_3^2 + 0,0136 \omega^2$$

## 2 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ 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 высевальных аппаратов: 1 – рама, 2 – электродвигатель постоянного тока, 3 – приводная цепь, 4 – частотный преобразователь, 5 – экспериментальный высевальной аппарат, 6 – семяпровод, 7 – вакуумная установка с регулятором разрежения, 8 – компрессор, 9 – датчики измерения скорости семян на выходе из семяпровода, 10 – персональный компьютер

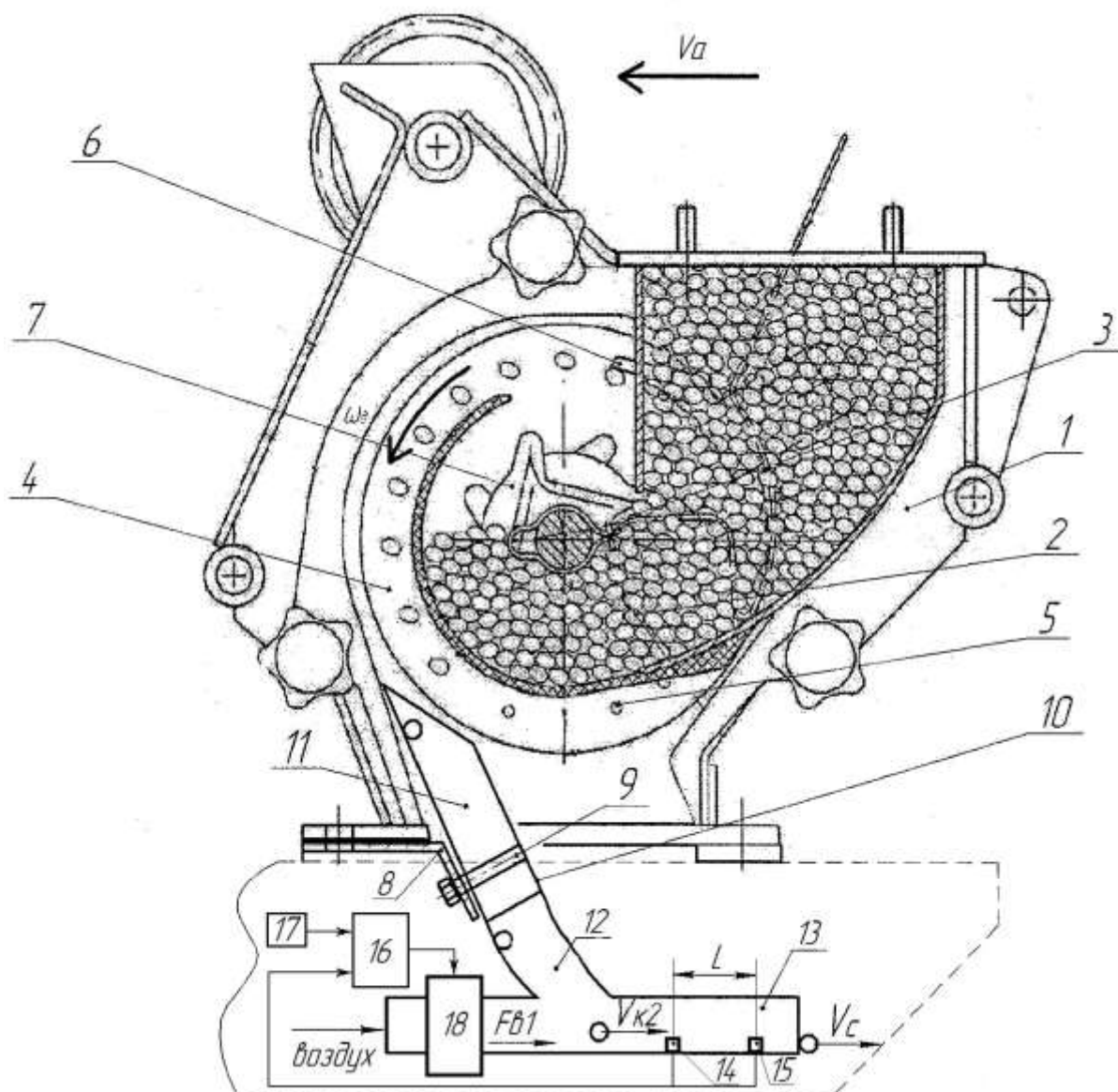


Рис. 7. Экспериментальный высеваящий аппарат с автоматизированной системой контроля и управления высевом пропашных культур: 1 корпус; 2 - семенная камера; 3 - вал; 4 - высеваящий диск; 5 - присасывающие отверстия; 6 - пластинчатый отражатель для удаления «лишних» семян; 7 - центральная резиновая ворошилка; 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)

Работа пневматического высеваящего аппарата (рис. 7) осуществляется следующим образом: семена из бункера (на рисунке не показан) поступают в семенную камеру 2 корпуса 1 высеваящего аппарата, из которой под действием разрежения, создаваемого в вакуумной камере (на рисунке не показана), присасываются к присасывающим отверстиям 5 высеваящего диска

4. Вращаясь вместе с высеваящим 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 высеваящим диском 4 в зону сбрасывания. Сходящее с высеваящего 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 ряда 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 высеваящего 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 исследований	Наименование фактора	Обозначение	Уровни факторов			Интервал варьирования
			нижний (-1)	основной (0)	верхний (+1)	
		$x_1$				
		$x_2$				
		$x_n$				

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зубрилина, Е.М. Обоснование параметров пневматического аппарата для одновременного высева семян кукурузы: дис. ... канд. техн. наук. – зерноград, 2002.
2. Пат. № 175130 RU МПК 7А01 С7/04 . Пневматический высевающий 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>.

Составители: Е.М. Зубрилина, В.П. Димитров

**ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА.  
ВЫБОР ФАКТОРОВ  
ПРАКТИКУМ**

---

Подписано в печать 30.08.2021  
Объем 0,9 усл. п.л., Офсет. Формат 60×84/16.  
Бумага тип №3. Заказ №5/09 .Тираж 100 экз. Цена свободная

---

ООО «ДГТУ-ПРИНТ»  
Адрес полиграфического предприятия:  
344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1