



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Управление качеством»

Методические указания
для выполнения практической работы
«Планы второго порядка.
некомпозиционный трехуровневый план
Бокса-Бенкина»
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. Методика проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных.....	13
2.1. Оборудование и приборы для проведения исследований.....	13
2.2. Методика проведения экспериментальных исследований.....	19
2.3 Методика обработки экспериментальных данных.....	23
3. Индивидуальные задания.....	30
Список литература.....	32
Приложение.....	33

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ - приобретение магистрантами компетенций по применению методики проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных с использованием некомпозиционного трехуровневого плана второго порядка Бокса-Бенкина.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В большинстве случаев целью исследования является получение математического описания изучаемого процесса. Часто из-за сложности процесса или малого объема информации неизвестную зависимость исследуемой величины ζ от k независимых факторов представляют полиномом [1]:

$$\zeta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i,j=1}^k \beta_{i,j} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

В этом случае необходимо определить коэффициенты уравнения и оценить их значимость. По результатам опытов можно определить только выборочные коэффициенты регрессии $b_0, b_i, b_{i,j}, b_{ii}, \dots$, которые являются лишь оценками теоретических коэффициентов $\beta_0, \beta_i, \beta_{i,j}, \beta_{ii}, \dots$ полинома (1).

Уравнение регрессии, полученное по результатам эксперимента, имеет вид [1]:

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

где y – выборочная оценка функции отклика ξ ;

k – число столбцов в матрице планирования эксперимента;

$x_0 = 1$.

Если на основе априорной информации известно, что исследуемый процесс можно с достаточной точностью описать полиномом второго порядка, то для получения модели некомпозиционные планы в ряде случаев рациональнее центральных композиционных планов второго порядка, в случае неадекватности полинома второго порядка переходят к планированию третьего порядка и описывают исследуемый процесс полиномом третьей степени.

Боксом и Бенкиным для числа факторов от 3 до 7 предложен ценный в практическом отношении класс некомпозиционных планов второго порядка. Эти планы представляют собой определенные выборки строк из полного факторного эксперимента (ПФЭ)

Основы теории эксперимента

типа 3^k (где $k=3$), где каждый фактор варьируется на трех уровнях: $+1, 0, -1$, а в центральных композиционных ротатабельных планах второго порядка факторы варьируются на пяти уровнях.

Смена уровней в процессе экспериментирования усложняет эксперимент и увеличивает его стоимость.

Некомпозиционные планы характеризуются наличием в строках матрицы планирования большого числа нулей (т.е. факторов на основном уровне), в результате чего существенно упрощается вычисление коэффициентов регрессии модели.

Некомпозиционные планы для 3, 4, 6 и 7 факторов требуют постановки меньшего числа опытов по сравнению с соответствующими ротатабельными центральными композиционными планами второго порядка (табл. 1).

Таблица 1

Числа опытов, предусмотренные некомпозиционными планами и центральными композиционными ротатабельными планами второго порядка

Число факторов	3	4	5	6	7
Некомпозиционный план (выборка из плана типа 3^k)	15	27	46	54	62
Центральный композиционный ротатабельный план второго порядка	20	31	32	58	92

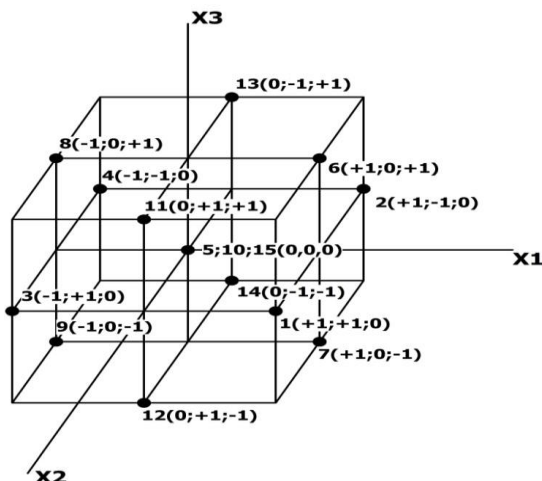


Рис. 1. Некомпозиционный трехуровневый план второго порядка Бокса-Бенкина (для трех факторов)

Основы теории эксперимента

Матрица плана эксперимента Бокса-Бенкина, изображенного на рис. 1, представлена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица некомпозиционного плана второго порядка для трех факторов (выборка из плана эксперимента 3^3) [2]

Номер опыта	Факторы и их взаимодействия										Отклик y
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	
1	+1	+1	+1	0	+1	0	0	+1	+1	0	y_1
2	+1	+1	-1	0	-1	0	0	+1	+1	0	y_2
3	+1	-1	+1	0	-1	0	0	+1	+1	0	y_3
4	+1	-1	-1	0	+1	0	0	+1	+1	0	y_4
5	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_5
6	+1	+1	0	+1	0	+1	0	+1	0	+1	y_6
7	+1	+1	0	-1	0	-1	0	+1	0	+1	y_7
8	+1	-1	0	+1	0	-1	0	+1	0	+1	y_8
9	+1	-1	0	-1	0	+1	0	+1	0	+1	y_9
10	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{10}
11	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	+1	+1	y_{11}
12	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	+1	+1	y_{12_2}
13	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	+1	+1	y_{13}
14	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	+1	+1	y_{14}
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{15}

Некомпозиционный план второго порядка для трех факторов предусматривает проведение 15 опытов (15 строк в матрице плана), причем три опыта (табл. 2, опыты 5; 10; 15) проводятся в центре плана, т. е. при нахождении всех факторов на нулевых (основных)

уровнях ($x_1 = x_2 = x_3 = 0$).

Рассмотренные Боксом и Бенкиным некомпозиционные планы для числа факторов от трех до семи имеют высокую степень ортогональности: только свободный член b_0 и коэффициенты b_{ij} при квадратичных членах коррелированы друг с другом.

При четырех и семи факторах указанные планы являются ротатабельными, а при другом числе факторов эти планы являются почти ротатабельными.

ПРИМЕР.

Цель работы – повышение качества посева пропашных культур пневматическими сеялками путем установки семяпроводов, обеспечивающих управляемость движением семян от высевающего аппарата до дна борозды [3].

Объект исследования – технологический процесс однозернового высева семян пропашной культуры (кукурузы) аппаратом пневматического действия с семяпроводом.

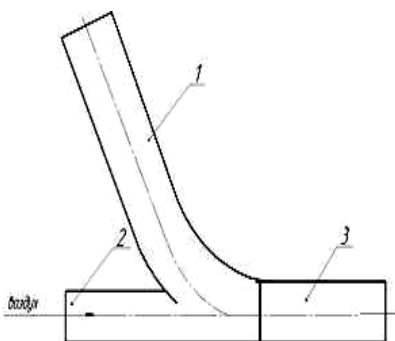
Предмет исследования – закономерности движения семян в семяпроводе усовершенствованного пневматического высевающего аппарата пропашной сеялки.

Основной задачей экспериментальных исследования являлось определение скорости семян на выходе из семяпровода высевающего аппарата (рис. 2, а, поз. 3).

Скорость измеряется с помощью специализированной системы измерения скорости семян на выходе из семяпровода, состоящей из двух фотоэлектрических (рис. 2, б; рис. 3, поз. 2 и 3)

датчика, установленных на расстоянии L_0 друг от друга по ходу движения семени, и блока управления, подающего импульс на персональный компьютер, для обработки и визуализации результата.

На основании анализа априорной информации выявлено 11 факторов, влияющих на параметр оптимизации Y (скорость семян на выходе с семяпровода – v_{cp}). Проведен анализ степеней влияния факторов на результат, их ранжирование и выявлены 3 основных фактора x_1, x_2 и x_3 (табл. 3).



- 1 – прямолинейный участок;
- 2 – нагнетательный участок;
- 3 – ускорительный участок

Рис. 2. Экспериментальный семяпровод с ускорителем семян к сеялке точного высева (типа СУПН-8А) [3]

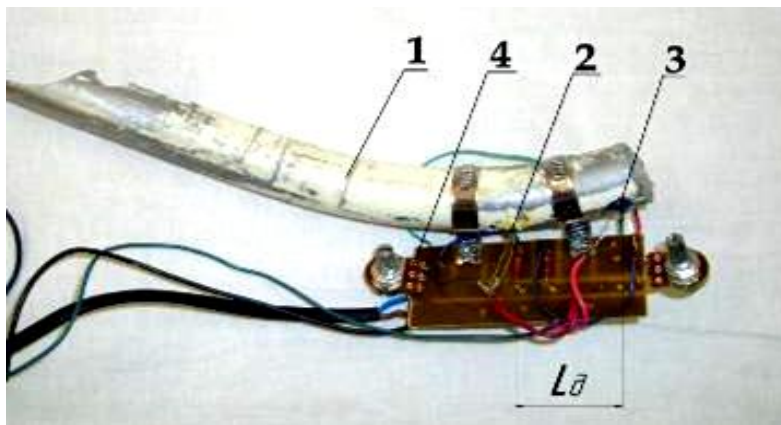


Рис. 3. Экспериментальный семяпровод с датчиками [3]:
 1 – экспериментальный семяпровод; 2 – первый датчик;
 3 – второй датчик; 4 – блок управления

Таблица 3
Основные факторы и уровни их варьирования [3]

Наименование фактора и единицы измерения	Обозначение	Уровни факторов			Интервал варьирования
		нижний (-1)	основной (0)	верхний (+1)	
v_6 - скорость воздушного потока в ускорителе, м/с	x_1	8	14	20	6
l_3 - длина ускорителя, м	x_2	0,08	0,12	0,16	0,04
ω - угловая скорость высевающего диска, рад/с	x_3	2	3	4	1

Параметром оптимизации является скорость семени на выходе из семяпровода ($v_{к3}$) (рис. 2, а, поз. 3), для определения значений которого был проведен трехфакторный эксперимент с использованием некомпозиционного трехуровневого плана второго порядка Бокса-Бенкина, матрица которого представлена в табл. 2.

Результаты проведенных в трёхкратной повторности (v_1, v_2, v_3) экспериментов по плану Бокса-Бенкина приведены в табл. 4 (столбцы 2,3,4), вычислена средняя скорость семян (v_{cp}) (столбец 5). Рассчитаны характеристики средней скорости семян на выходе из семяпровода по строкам матрицы планирования: дисперсия σ_i^2 ; среднеквадратическое отклонение σ ; коэффициент вариации V ; абсолютная ошибка e_o ; относительная ошибка \mathcal{E} (табл. 4, столбцы 6-10). Методика расчета характеристик параметра оптимизации приведена в разделе 2 «Методики проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных» (формулы (3)-(8)).

Оценка однородности дисперсий производилась по критерию Кохрена (формула (9)) [2]. Результаты проверки гипотезы однородности дисперсий подтвердили при 5% уровне

Основы теории эксперимента

значимости, достоверность полученных значений параметра оптимизации и отсутствие грубых ошибок при проведении эксперимента, т.к. опытное значение (0,324) критерия Кохрена меньше табличного (0,432).

По данным табл. 4 (столбец 6) полученное значение дисперсии воспроизводимости ($\sigma_{\text{в.о.с}}^2 = 0,00063$, рассчитана по формуле (21)) является средним по всем опытам с дисперсией, характеризует внутреннюю стабильность и управляемость исследуемого объекта.

Таблица 4 - Скорость семян на выходе из семяпровода, высеянных экспериментальным высевающим аппаратом, в параллельных опытах по строкам матрицы планирования (м/с) и характеристики средней скорости семян на выходе из семяпровода по строкам матрицы планирования [3]

№ опыта	v_1	v_2	v_3	Средняя скорость семян	Дисперсия σ_i^2 , м/с.	Средне-квартическое	Коэффициент вариации V , %	Абсолютная ошибка e_o	Относительная ошибка
1	2	3	4	$\bar{v}_{\text{ср}}$	6	7	8	9	10
1	3,489	3,491	3,513	3,498	0,0001773	0,0133	0,4100	0,0330	1,0168
2	2,691	2,643	2,682	2,672	0,0006510	0,0255	0,9549	0,0633	2,3681
3	1,784	1,801	1,709	1,792	0,0000743	0,0086	0,5315	0,0214	1,3182
4	1,593	1,576	1,591	1,587	0,0000863	0,0093	0,6069	0,0230	1,5051
5	2,314	2,319	2,303	2,312	0,0000670	0,0082	0,3439	0,0203	0,8529
6	3,21	3,129	3,151	3,163	0,0017543	0,0419	1,3242	0,1039	3,2840
7	3,211	3,101	3,171	3,161	0,0031000	0,0557	1,7614	0,1381	4,3683
8	1,652	1,712	1,672	1,679	0,0009333	0,0306	1,8196	0,0758	4,5125
9	1,651	1,711	1,673	1,678	0,0009213	0,0304	1,8089	0,0753	4,4861
10	2,369	2,399	2,4	2,389	0,0003103	0,0176	0,7499	0,0437	1,8599

Основы теории эксперимента

1 1	2,6 78	2,6 57	2,6 34	2,656	0,0004 843	0,022 0	0,8286	0,0546	2,054 9
1 2	2,6 74	2,6 43	2,6 29	2,649	0,0005 303	0,023 0	0,8680	0,0571	2,152 7
1 3	2,0 41	2,0 69	2,0 71	2,060	0,0002 813	0,016 8	0,8142	0,0416	2,019 3
1 4	2,0 63	2,0 47	2,0 68	2,059	0,0001 203	0,011 0	0,5328	0,0272	1,321 3
1 5	2,3 97	2,3 81	2,3 89	2,389	0,0000 640	0,008 0	0,3394	0,0198	0,841 7
	Экспериментальные данные			Расчетная	$\sigma_{вос}^2 = 0,00063$	-	-	-	-
	Характеристики средней скорости семян на выходе из семяпровода								

Коэффициенты регрессии (табл. 5) определены по методике, описанной в разделе 2 (формулы (10)-(20)) [2].

Таблица 5 - Значения коэффициентов регрессии и значений критерия Стьюдента [3]

Обозначение коэффициентов регрессии	y		
	Значение коэффициентов регрессии	Расчетное значение критерия Стьюдента t_i	Табличное значение критерия Стьюдента $t_{табл}$
1	2	3	4
b_0	2,3633	626,5429	2,13
b_1	0,7205	191,0116	
b_2	0,2779	73,66739	
b_3	0,0014	0,364526	
b_{12}	0,1538	40,76063	
b_{13}	0,0002	0,066277	
b_{23}	0,0015	0,397665	
b_{11}	0,0433	11,48809	
b_{22}	-0,0209	5,54521	

b_{33}	0,0136	3,601075	
----------	--------	----------	--

Для коэффициентов регрессии (см. табл. 5) среднее квадратическое отклонение $\sigma_{b_i} = 0,0037$ (формула (22)). Значимость коэффициентов регрессии проверена с помощью критерия Стьюдента t_i (формула (23)), табличное значение которого при $\alpha = 0,95$ составляет $t_{табл} = 2,12$. Из полученных данных критерия Стьюдента видно, что значения коэффициентов b_3 , b_{13} и b_{23} меньше табличного значения критерия Стьюдента $t_{табл}$, тогда можно принять эти коэффициенты незначимыми.

С учетом значений и значимости коэффициентов регрессии получена модель процесса высева семян кукурузы с применением семяпровода с ускорителем, уравнение регрессии которых характеризует зависимость y от факторов x_1, x_2 и x_3 .

$$y = 2,3633 + 0,7205x_1 + 0,2779x_2 + 0,1538x_1x_2 - 0,0433x_1^2 - 0,0209x_2^2 + 0,0136x_3^2$$

Уравнение устанавливает зависимость между параметром оптимизации – скоростью семян на выходе из семяпровода с ускорителем (y) от скорости воздушного потока x_1 , длины ускорителя семяпровода x_2 и угловой скорости высевающего диска x_3 .

Уравнение регрессии после раскодирования имеет вид:

$$v_{к3} = 0,6315 + 0,0770 v_e - 0,9983 l_3 + 0,6408 v_e \cdot l_3 - 0,0012 v_e^2 - 13,0625 l_3^2 + 0,0136 \omega^2$$

Адекватность этой математической модели проверена по критерию Фишера (формула (24), второй раздел). Установлено, что $F_p < F_{табл}$ ($1,85 < 2,3$), следовательно, полученная математическая модель – адекватна [3].

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Эксперимент по некомпозиционному трехуровневому плану второго порядка Бокса-Бенкина будет приводиться в лаборатории

Основы теории эксперимента

«Q-фактор» кафедры «Управление качеством», на лабораторном оборудовании и с использованием измерительных приборов лаборатории, описание которых приведено ниже.

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

Объект исследования – технологический процесс однозернового высева семян пропашной культуры (кукурузы) аппаратом пневматического действия с автоматизированной системой контроля и управления качеством высева пропашных культур.

Предмет исследования – закономерности движения семян в семяпроводе с автоматизированной системой контроля и управления качеством высева пропашных культур.

2.1. Оборудование и приборы для проведения исследований

Экспериментальные исследования по определению качества высева семян пропашных культур сеялкой с автоматизированной системой контроля и управления качеством высева выполняются на лабораторной установке, представленной на рис. 4.

Лабораторная установка включает (рис. 4):

- раму 1 для крепления на ней комплектующих узлов;
- электромеханический привод высевающего аппарата с электродвигателем постоянного тока 2, частотный преобразователь 4, приводная цепь 3;
- экспериментальный высевающий аппарат 5;
- вакуумную установку 7 с регулятором расхода воздуха;
- воздухонагнетающее устройство (компрессор) 8 с регулируемой подачей воздуха;
- систему измерения скорости семян, включающую: датчики измерения 9 скорости семян на выходе из семяпровода 6, блок управления датчиками (на фото не указан); персональный компьютер 10.

Характеристика основного оборудования лабораторной установки:

- преобразователь частоты: номинальная мощность двигателя – 2,2кВт, номинальный выходной ток – 5,5А, выходное напряжение – трехфазное, от 0В до напряжения питания, выходная частота – 0,1-600Гц, несущая частота ШИМ – 1–15кГц, номинальное напряжение питания – 3 фазы 380-480VAC, 50/60Гц;

Основы теории эксперимента

– компрессор: мощность – 1,5 кВт, объем ресивера – 50 л, производительность – 185 л/мин, максимальное давление – 8 атм, количество оборотов – 2850 об/мин;

– электродвигатель постоянного тока: номинальная мощность двигателя – 2,2кВт, частота – 50 Гц, напряжение – 220, 380 В.

Электромеханический привод установки позволяет получать регулируемую частоту вращения высевающего диска аппарата в пределах от 0 до 100 об/мин. Механическая часть привода имеет приводную цепь из 64 звеньев и звездочки вала аппарата с шестнадцатью зубьями, то есть один оборот цепи соответствует четырем оборотам вала аппарата. Такое соотношение позволяет производить отсчет числа оборотов вала аппарата при проведении опытов по контрольным меткам на цепи привода и раме установки.

Вакуумная установка предназначена для получения регулируемого разрежения в вакуумной камере аппарата в пределах от 1,8 до 6 кПа, в зависимости от положения регулятора расхода и загрузки высевающего диска семенами.

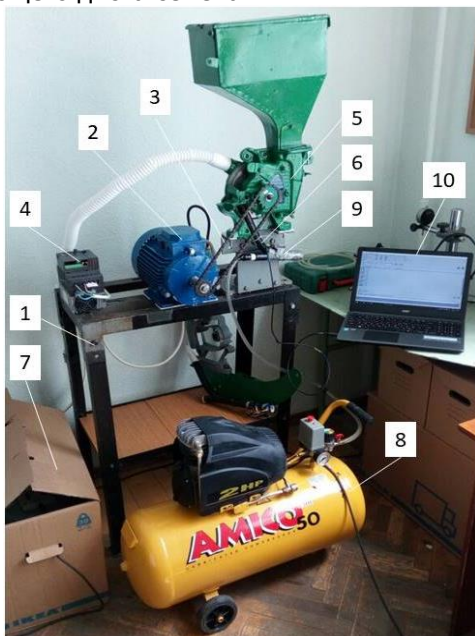


Рис. 4. Лабораторная установка для исследований пневматических высевающих аппаратов

Основы теории эксперимента

В качестве объекта исследования используется экспериментальный высевательный аппарат с автоматизированной системой контроля и управления качеством высева семян пропашных культур (рис. 5), конструкция которого запатентована [4].

Пневматический высевательный аппарат (рис. 5) содержит корпус 1 с семенной камерой 2 и камерой разрежения (на чертеже не показана), между которыми на горизонтальном валу 3 установлен высевательный диск 4 с присасывающими отверстиями 5 и пластинчатый отражатель для удаления «лишних» семян 6, примыкающий к торцевой плоскости высевательного диска, на горизонтальном валу 3 которого установлена центральная резиновая ворошилка 7. В нижней части корпуса 1 высевательного аппарата через кронштейн 8 хомутом 9 крепится семяпровод 10, представляющий собой трубку круглого сечения и имеющий три участка: прямолинейный 11, криволинейный 12 и ускорительный 13.

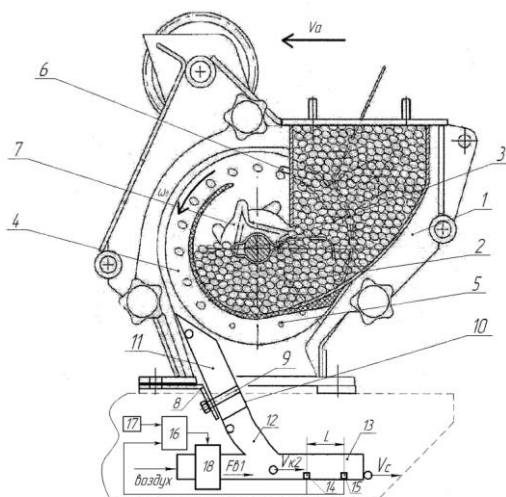


Рис. 5. Экспериментальный высевательный аппарат с автоматизированной системой контроля и управления высеваем пропашных культур [4]

На ускорительном участке семяпровода 13 расположены первый 14 и второй датчики 15, при этом выходы первого и второго датчиков соединены с соответствующими входами блока монито-

Основы теории эксперимента

ринга и контроля 16, на который поступает сигнал с датчика скорости посевного агрегата 17. Также в начале ускорительного участка семяпровода установлен блок управления воздушным потоком 18 (дроссельная заслонка, содержащая корпус, в котором размещен поворотный диск, соединенный с сервоприводом).

Работа пневматического высевашего аппарата осуществляется следующим образом: семена из бункера (на рисунке не показан) поступают в семенную камеру 2 корпуса 1 высевашего аппарата, из которой под действием разрежения, создаваемого в вакуумной камере (на рисунке не показана), присасываются к присасывающим отверстиям 5 высевашего диска 4. Вращаясь вместе с высевашим 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 высевашим диском 4 в зону сбрасывания. Сходящее с высевашего 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 датчиками 15, скорость посевного агрегата V_a определяется датчиком 17. Данные значения поступают в блок мониторинга и контроля 16, в

Основы теории эксперимента

котором осуществляется сравнение скоростей и выработка управляющего воздействия для сервопривода дроссельной заслонки (блок управления воздушным потоком) 18.

Для визуальных наблюдений за процессом высева семян (исследований), а также для фотосъемки его этапов и фрагментов конструкции аппарата некоторые стенки и перегородки корпуса аппарата были удалены, а часть из них заменена оргстеклом.

Для измерения скорости семени в семяпроводе 1 устанавливаются два фотоэлектрических (рис. 6, поз. 2 и 3) датчика на расстоянии L_d друг от друга по ходу движения семени. Каждый датчик состоит из инфракрасного излучателя и фотоприемника, размещенных напротив друг друга. Для этого в семяпроводе высверливаются отверстия, в которые вставляются фотоэлектрические датчики (рис. 6).

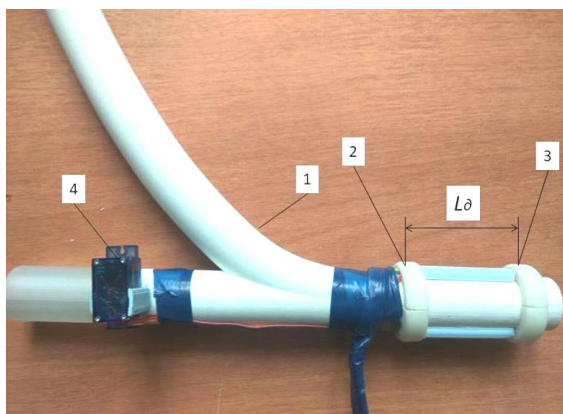


Рис. 6. Семяпровод с датчиками движения:
 1 – семяпровод; 2 и 3 – датчики движения;
 4 – блок управления заслонкой

В этом типе датчиков приемник 2 и излучатель 1 (рис. 7) расположены напротив друг друга таким образом, что световой поток из излучателя попадает непосредственно в приемник. Положение объекта 3 определяется, когда он перекрывает луч от излучателя 1 в приемник 2. Настройка взаимного расположения датчиков заключается в том, чтобы максимальное количество света Φ , от излучателя 1 попадало бы в приемник 2.

Основы теории эксперимента

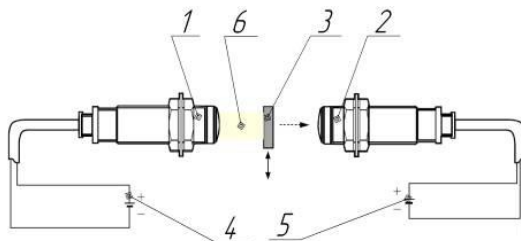


Рис. 7. Схема работы фотоэлектрических датчиков:
 1 – излучатель; 2 – приемник; 3 – объект; 4,5 – источник питания; 6 – световой поток

Расчет интервала времени и скорости семян на выходе из семяпровода осуществляется по алгоритму, написанному для персонального компьютера 10 (см. рис. 4). Результаты обработки данных выводятся на монитор персонального компьютера.

Скорость воздушного потока на выходе из семяпровода определяется анемометром АПР-2 (рис. 8): измерительный диапазон (температура):

0–50 °С; измерительный диапазон (скорость ветра): 0,4–30м/с;
 точность измерения (температура): $\pm 1,2^{\circ}\text{C}$; точность измерения (скорость ветра): $\pm(3\% + 0,2\text{м/с})$; разрешение (температура): $0,1^{\circ}\text{C}$; разрешение (скорость ветра): 0,1м/с.



Рис. 8. Анемометр АПР-2

2.2. Методика проведения экспериментальных исследований

1. Определить цель, объект, предмет исследования и параметр оптимизации.

Основы теории эксперимента

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

Объект исследования – технологический процесс однозернового высева семян пропашной культуры (кукурузы) аппаратом пневматического действия с автоматизированной системой контроля и управления качеством высева пропашных культур.

Предмет исследования – установление закономерности изменения скорости семян на выходе из семяпровода с автоматизированной системой контроля и управления качеством высева пропашных культур в зависимости от 3 основных факторов.

Параметр оптимизации – скорость семян на выходе с семяпровода.

2. Выбрать оборудование и приборы для проведения исследований (см. пункт 2.1).

3. Выбрать основные факторы (3 фактора) и их уровни варьирования (3 уровня) для проведения экспериментов в соответствии с индивидуальным заданием (табл. 12, а, 12, б) и заполнить табл. 6.

4. Составить матрицу плана эксперимента Бокса-Бенкина (табл. 2).

5. Провести трехфакторный эксперимент по плану Бокса-Бенкина согласно матрице (табл. 2) с m -кратной повторностью каждого опыта (каждой строки матрицы). В начале проведения эксперимента необходимо выставить все факторы на уровни, соответствующие номеру строки матрицы, а числовые значения уровней в соответствии с табл. 6.

Первый фактор (U_6 - скорость воздушного потока в ускорителе, м/с) варьируется путем регулировки подачи воздуха воздушно-нагнетающим устройством (компрессором) (рис. 4, поз. 8) в диапазоне варьирования этого фактора.

Второй фактор (l_3 – длина ускорителя, м) изменяется путем смены участка l_3 различной длины семяпровода в соответствии с уровнями варьирования.

Таблица 6

Основные факторы и уровни их варьирования [3]

		Уровни факторов	
--	--	-----------------	--

Основы теории эксперимента

Наименование фактора и единицы измерения	Обозначение	нижний (-1)	основной (0)	верхний (+1)	Интервал варьирования
v_6 - скорость воздушного потока в ускорителе, м/с	X_1				
l_3 - длина ускорителя, м	X_2				
ω - угловая скорость высевающего диска, рад/с	X_3				

Фактор 3 (угловая скорость высевающего диска x_3) выставляется на лабораторной установке (рис. 4) в следующей последовательности:

- включить управляющее устройство в сеть 320 В;
- дождаться появления на дисплее преобразователя частоты (рис. 4, поз. 4) стартового значения: R 0,0;
- с помощью клавиши «Mode» установить режим «U» - выбор количества оборотов (однократное нажатие на клавишу). Количество оборотов соответствует угловой скорости вращения высевающего диска, которая является фактором варьирования (табл. 7).



Таблица 7

Соответствие скорости движения аппарата и скорости, устанавливаемой на лабораторном стенде

Скорость движения аппарата, км/ч (м/с)	Угловая скорость высевающего диска, рад/сек	Скорость на лабораторном стенде, об/мин.
5,3	2	19

Основы теории эксперимента

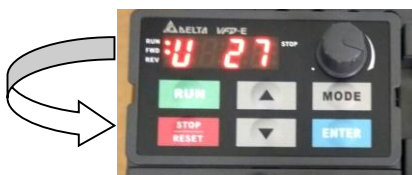
6,6	2,5	24
8	3	29
9,3	3,5	33
10,5	4	38
11,9	4,5	43
13,2	5	47
14,5	5,5	52
15,8	6	57

Значение угловой скорости выбирают с учетом строки матрицы (табл. 2) и возможных значений уровней варьирования (табл. 6).

«U» 31 – соответствует ____ оборотам диска и ____ его скорости вращения);



– клавишами с «▲» (увеличение) и «▼» (уменьшение) установить необходимое количество оборотов: например, с «U» 31 снизили до «U» 27;



– нажатием кнопки «RUN» осуществляется пуск двигателя, кнопка «STOP-RESET» останавливает работу двигателя.

6. Эксперимент производится следующим образом:

– настроенный на работу высевающий аппарат включается без подачи вакуума на аппарат;

– с помощью преобразователя частоты устанавливается частота вращения высевающего диска аппарата (x_3 – угловая скорость высевающего диска ω) на соответствующие уровни (+1; 0; -1) (табл. 6);

– включается вакуумная установка и вакуум определенной величины подается на высевающий аппарат;

Основы теории эксперимента

– согласно матрице планирования эксперимента (табл. 2) устанавливаются основные факторы: x_1 – скорость воздушного потока v_g , подаваемого в ускоритель семяпровода; x_2 – длина ускорителя семяпровода l_3 на соответствующие уровни (+1;0; -1) (табл. 6);

– после стабилизации процесса высева семян включается специальная программа на ПК и проводится замер скорости 100 высеянных семян системой измерения скорости семян (рис. 4);

– определение скорости семян на выходе из семяпровода с ускорителем (рис. 4) осуществляется датчиками, установленными на выходе из семяпровода;

– эксперимент проводится по 15 строкам матрицы планирования (табл. 2) с трехкратной повторностью каждого сочетания уровней факторов.

7.Полученные в ходе эксперимента значения параметра оптимизации (функции отклика) (y_{1i}, y_{2i}, y_{3i}) занести в сводную таблицу (табл. 8).

Таблица 8
Результаты экспериментальных данных

Номер опыта	y_{1i}	y_{2i}	y_{3i}	Среднее значение параметра оптимизации опыта \bar{y}_i . м/с
1	2	3	4	5
1				$\bar{y}_1 = \dots$
2	$\bar{y}_2 = \dots$

15				$\bar{y}_{15} = \dots$

2.3 Методика обработки экспериментальных данных

После проведения активного эксперимента, полученные экспериментальные данные (табл. 8) подвергаются обработке, и для каждого i -го опыта ($i=1, \dots, N$) определяются: среднее значение, среднеквадратичное отклонение, коэффициент вариации, абсолютная ошибка средней подачи семян, относительная ошибка опыта (табл. 9) [2, 3].

Экспериментальные данные обрабатываются в соответствии со следующей методикой [2,3].

1. Для каждого i -го опыта ($i=1, \dots, m$) определяются числовые характеристики:

– среднее значение (табл. 9, столбец 2):

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{i=1}^m y_i}{m} ; \quad (3)$$

– дисперсия (табл. 9, столбец 3):

$$D^2(y_i) = \frac{\sum_{i=1}^m [y_i - \bar{y}_i]^2}{m-1} ; \quad (4)$$

– среднеквадратичное отклонение (табл. 9, столбец 4):

$$\sigma = \sqrt{D^2(y_i)} ; \quad (5)$$

– коэффициент вариации (табл. 9, столбец 5):

$$V = \frac{\sigma}{\bar{y}_i} \cdot 100 ; \quad (6)$$

– абсолютная ошибка средней подачи семян (табл. 9, столбец 6):

$$e_o = \frac{t_\alpha \cdot \sigma}{\sqrt{m}} = \frac{4,3 \cdot \sigma}{\sqrt{3}} = 2,48\sigma ; \quad (7)$$

– относительная ошибка опыта (табл. 9, столбец 7):

$$\varepsilon = \frac{e_o}{\bar{y}_i} \cdot 100, \% \quad (8)$$

где \bar{y}_i – среднее значение параметра оптимизации в i -й строке матрицы планирования по m параллельных опытов.

Рассчитанные по данной методике значения заносятся в табл. 9.

Таблица 9 - Результаты экспериментальных данных в параллельных опытах по строкам матрицы планирования и их числовые характеристики [3]

№ опыта	Среднее значение параметра оптимизации опыта \bar{y}_i , м/с	Дисперсия σ_i^2 , м/с	Среднеквадратическое отклонение σ , м/с	Коэффициент вариации V , %	Абсолютная ошибка e_o , м/с	Относительная ошибка ε , %
	2	3	4	5	6	7
1						
2						

15						
		$\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 = \dots$				

		$\sigma_{\text{вс}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}{N}$ $= \dots$				
--	--	--	--	--	--	--

2. Оценка однородности дисперсий производится по критерию Кохрена [2,3]:

$$G_p = \frac{\sigma_{i \max}^2}{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2} \quad (9)$$

Среди всей совокупности рассчитанных построчных дисперсий выбирается максимальная $\sigma_{i \max}^2$ и берется отношение данной дисперсии к сумме всех построчных дисперсий $\sum_{i=1}^N \sigma_i^2$, т.е. определяется расчетное значение критерия Кохрена.

С критерием G_p связаны степени свободы: для числителя $f_1 = m - 1$, для знаменателя $f_2 = N$. Для заданной доверительной вероятности α по значениям f_1 и f_2 определяется критическое табличное значение критерия Кохрена G_T (табл. 1 приложения), с которым сравнивают расчетное. В нашем случае, при $m = 3$ и $N = 15$, табличное значение $G_T = 0,432$.

Если выполняется условие $G_p < G_T$, то с выбранным уровнем статистической значимости α (с достоверностью $1 - \alpha$) все построчные дисперсии признаются однородными. В противном случае гипотезу отвергают.

3. Определение коэффициентов уравнения регрессии по матрице плана Бокса-Бенкина трехфакторного эксперимента производится по следующим выражениям (табл. 8, столбец 5) [2, 3]:

$$b_0 = \frac{1}{3}(\bar{y}_5 + \bar{y}_{10} + \bar{y}_{15}) \quad (10)$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(\bar{y}_1 + \bar{y}_2 - \bar{y}_3 - \bar{y}_4 + \bar{y}_6 + \bar{y}_7 - \bar{y}_8 - \bar{y}_9) \quad (11)$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(\bar{y}_1 - \bar{y}_2 + \bar{y}_3 - \bar{y}_4 + \bar{y}_{11} + \bar{y}_{12} - \bar{y}_{13} - \bar{y}_{14}) \quad (12)$$

Основы теории эксперимента

$$b_3 = \frac{1}{8}(\bar{y}_6 - \bar{y}_7 + \bar{y}_8 - \bar{y}_9 + \bar{y}_{11} - \bar{y}_{12} + \bar{y}_{13} - \bar{y}_{14}), \quad (13)$$

$$b_{12} = \frac{1}{4}(\bar{y}_1 - \bar{y}_2 - \bar{y}_3 + \bar{y}_4), \quad (14)$$

$$b_{13} = \frac{1}{4}(\bar{y}_6 - \bar{y}_7 - \bar{y}_8 + \bar{y}_9), \quad (15)$$

$$b_{23} = \frac{1}{4}(\bar{y}_{11} - \bar{y}_{12} - \bar{y}_{13} + \bar{y}_{14}), \quad (16)$$

$$C = \frac{1}{8} \left(\sum_1^{15} \bar{y}_i - 7b_0 \right), \quad (17)$$

$$b_{11} = C - 0,25 \sum_{11}^{14} \bar{y}_i, \quad (18)$$

$$b_{22} = C - 0,25 \sum_6^9 \bar{y}_i, \quad (19)$$

$$b_{33} = C - 0,25 \sum_1^4 \bar{y}_i. \quad (20)$$

Полученные значения коэффициентов уравнения регрессии внести в табл. 10.

4.Оценкой генеральной дисперсии воспроизводимости, характеризующей точность одного измерения, является средняя из всех построчных дисперсий. Дисперсия воспроизводимости откликов (дисперсия параметра оптимизации) определится по формуле [2,3]:

$$\sigma_{\text{noc}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}{N} \quad (21)$$

5.Среднее квадратическое отклонение для коэффициентов уравнений регрессий определится по формуле [2,3]:

$$\sigma_{b_i} = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{noc}}^2}{m \cdot N}}. \quad (22)$$

6.Значимость коэффициентов регрессии проверяют с помощью критерия Стьюдента [2,3]:

$$t_i = \frac{|b_i|}{\sigma_{b_i}} \quad (23)$$

Основы теории эксперимента

Полученные по формуле (23) данные значений коэффициентов Стьюдента для каждого коэффициента регрессии сравнивают с табличным значением, которое определяется по заданной доверительной вероятности α и числу степеней свободы

$$f = N(m-1) \quad [1]. \text{ При уровне статистической значимости } \alpha =$$

0,05 и числе степеней свободы $f = 15(3-1) = 30$ (для плана Бокса-Бенкина) определим табличное значение коэффициента

(табл. 2 приложения). Оно равно $t_{табл} = 2,04$.

Если расчетное значение больше табличного, то можно говорить о значимости коэффициента, незначимые исключаются и не используются при составлении уравнения регрессии.

Таблица 10 - Значения коэффициентов регрессии и значений критерия Стьюдента [2, 3]

Обозначение коэффициентов регрессии	Значение коэффициентов регрессии	Расчетное значение критерия Стьюдента t_i	Табличное значение критерия Стьюдента $t_{табл}$
b_0			2,04
b_1			
b_2			
b_3			
b_{12}			
b_{13}			
b_{23}			
b_{11}			
b_{22}			
b_{33}			

7. Составить уравнения регрессии, подставляя в формулу (2) числовые значения коэффициентов регрессии. Получим модель исследуемого процесса. Например,

$$y_{расч} = 2,3633 + 0,7205x_1 + 0,2779x_2 + 0,1538x_1x_2 - 0,0433x_1^2 - 0,0209x_2^2 + 0,0136x_3^2$$

По полученному уравнению регрессии рассчитаем значения параметра оптимизации по модели y_{pi} и внесем эти значения

во вспомогательную табл. 11.

Таблица 11 - Дополнительная таблица для расчета адекватности модели

Основы теории эксперимента

№ опыта	Среднее значение параметра оптимизации (по экспериментальным данным) \bar{y}_i . м/с	Значение параметра оптимизации, рассчитанное по модели $y_{расч}$	Дисперсия $\sigma_i^2 = (\bar{y}_i - y_{pi})^2$, м/с.	Относительная погрешность модели $\delta = \frac{ y_{pi} - \bar{y}_i }{\bar{y}_i} \cdot 100$, %
1				
....
....
15				
-			$\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 = \dots$	
-			$\sigma_{ад}^2 = \frac{m}{N-l} * \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - y_{расч})^2 = \dots$	

8. Адекватность полученной модели проверяем по F – критерию [2,3]:

$$F_p = \frac{\sigma_{ад}^2}{\sigma_{вос}^2}. \quad (24)$$

Для вычисления дисперсии адекватности находим сумму квадратов отклонений расчетных значений параметра оптимизации от экспериментальных значений во всех точках плана. Адекватность математической модели определяем, сравнивая дисперсию воспроизводимости с дисперсией адекватности.

9. Дисперсию адекватности рассчитываем по формуле [2, 3]:

$$\sigma_{ад}^2 = \frac{m}{N-l} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - y_{расч})^2, \quad (25)$$

где l – число значимых коэффициентов регрессии.

Для заданной доверительной вероятности α по значениям $f_1 = N - l$ и $f_2 = N(m - 1)$ определяется табличное значение критерия Фишера F_T . Если $F_T < F_p$, то полученная регрессионная

модель с принятым уровнем статистической значимости α адекватна экспериментальным данным.

10. Если модель адекватна, то осуществляем переход от безразмерного полинома к размерному полиному. Для этого в безразмерный полином подставим выражения для кодированных факторов, после чего раскрываем все скобки и приводим подобные слагаемые, получим уравнения в натуральном виде.

Например,

$$v_{x3} = 0,6315 + 0,0770 v_6 - 0,9983 l_3 + 0,6408 v_6 \cdot l_3 - 0,0012 v_6^2 - 13,0625 l_3^2 + 0,0136 \omega^2$$

3. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Учебная группа магистрантов разделяется на две подгруппы. Одна подгруппа выполняет задание по табл. 12, а, вторая – по 12, б.

Таблица 12а - Вариант значения основных факторов и уровней их варьирования

Наименование фактора и единицы измерения	Обозначение	Уровни факторов			Интервал варьирования
		нижний (-1)	основной (0)	верхний (+1)	
v_6 - скорость воздушного потока в ускорителе, м/с	X_1	7	12	19	5
l_3 - длина ускорителя, м	X_2	0,08	0,10	0,12	0,02
ω - угловая скорость высевающего диска, рад/с	X_3	1	3	5	2

Таблица 12б - Вариант значения основных факторов и уровней их варьирования

Наименование фактора и единицы измерения	Обозначение	Уровни факторов			Интервал варьирования
		нижний (-1)	основной (0)	верхний (+1)	
U_6 - скорость воздушного потока в ускорителе, м/с	X_1	12	15	18	3
l_3 - длина ускорителя, м	X_2	0,06	0,09	0,12	0,03
ω - угловая скорость высевающего диска, рад/с	X_3	2	4	6	2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 264 с. – (Сер. «Матем. статистика для экономистов»).
2. Зубрилина Е.М. Обоснование параметров пневматического аппарата для одновременного высева семян кукурузы: дис. ... канд. тех. наук. – зерноград, 2002.
3. Чикильдин В.Н. Совершенствование процесса высева семян пропашных культур пневматической сеялкой (на примере кукурузы): дис. ... канд. тех. наук. – Ставрополь, 2011. – 154 с.
4. 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.
5. Зубрилина Е.М., Управление качеством процесса высева семян пропашных культур пневматическим высевающим аппаратом с системой контроля / Е.М. Зубрилина // Качество продукции: контроль, повышение, планирование: сб. ст. междунар. молодежн. науч.-практ. конф. – Курск, 2014. – С. 199-202. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22865377>

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1- Критические значения для критерия Кохрена

Число степеней свободы, $f_1 = m - 1$							
$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$		$n = 5$	
1 %	5 %	1 %	5 %	1 %	5 %	1 %	5 %
-	-	00,995	00,975	00,979	00,939	00,959	00,906
	00,967	00,942	00,871	00,883	00,798	00,834	00,746
00,968	00,906	00,864	00,768	00,781	00,684	00,721	00,629
00,928	00,841	00,788	00,684	00,696	00,598	00,633	00,544
00,883	00,781	00,722	00,616	00,626	00,532	00,564	00,480
00,838	00,727	00,664	00,561	00,568	00,480	00,508	00,431
00,794	00,680	00,615	00,516	00,521	00,438	00,463	00,391
00,754	00,638	00,573	00,478	00,481	00,403	00,425	00,358
00,718	00,602	00,536	00,445	00,447	00,373	00,393	00,331
00,684	00,570	00,504	00,417	00,418	00,348	00,366	00,308
00,653	00,541	00,475	00,392	00,392	00,326	00,343	00,288
00,624	00,515	00,450	00,371	00,369	00,307	00,322	00,271
00,599	00,492	00,427	00,352	00,349	00,291	00,304	00,255
00,575	00,471	00,407	00,335	00,332	00,276	00,288	00,242
00,553	00,452	00,388	00,319	00,316	00,262	00,274	00,230
00,532	00,434	00,372	00,305	00,301	00,250	00,261	00,219
00,514	00,418	00,356	00,293	00,288	00,240	00,249	00,209
00,496	00,403	00,343	00,281	00,276	00,230	00,238	00,200
	00,389	00,330	00,270	00,265	00,220	00,229	00,192
00,465	00,377	00,318	00,261	00,255	00,212	00,220	00,185
00,450	00,365	00,307	00,252	00,246	00,204	00,212	00,178
00,437	00,354	00,297	00,243	00,238	00,197	00,204	00,172
00,425	00,343	00,287	00,235	00,230	00,191	00,197	00,166
00,413	00,334	00,278	00,228	00,222	00,185	00,190	00,160
00,402	00,325	00,270	00,221	00,215	00,179	00,184	00,155

Основы теории эксперимента

Число степеней свободы, $f_1 = m - 1$							
$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$		$n = 5$	
1 %	5 %	1 %	5 %	1 %	5 %	1 %	5 %
00,391	00,316	00,262	00,215	00,209	00,173	00,179	00,150
00,382	00,308	00,255	00,209	00,202	00,168	00,173	00,146
00,372	00,300	00,248	00,203	00,196	00,164	00,168	00,142
00,363	00,293	00,241	00,198	00,191	00,159	00,164	00,138
00,355	00,286	00,235	00,193	00,186	00,155	00,159	00,134
00,347	00,280	00,229	00,188	00,181	00,151	00,155	00,131
00,339	00,273	00,224	00,184	00,177	00,147	00,151	00,127
00,332	00,267	00,218	00,179	00,172	00,144	00,147	00,124
00,325	00,262	00,213	00,175	00,168	00,140	00,144	00,121
00,318	00,256	00,208	00,172	00,165	00,137	00,140	00,118
00,312	00,251	00,204	00,168	00,161	00,134	00,137	00,116
00,306	00,246	00,200	00,164	00,157	00,131	00,134	00,113
00,300	00,242	00,196	00,161	00,154	00,129	00,131	00,111
00,294	00,237	00,192	00,158	00,151	00,126	00,128	00,108

Таблица 2 - Критические значения коэффициента Стьюдента (t -критерия) для различной доверительной вероятности α и числа степеней свободы f

	α
--	----------

Основы теории эксперимента

ff	0.80	0.90	0.95	0.98	0.99	0.995	0.998	0.999
11	3.0770	6.3130	12.7060	31.820	63.656	127.656	318.306	636.6
12	1.8850	2.9200	4.3020	6.964	9.924	14.089	22.327	31.5
13	1.6377	2.35340	3.182	4.540	5.840	7.458	10.214	12.9
14	1.5332	2.13180	2.776	3.746	4.604	5.597	7.173	8.610
15	1.4759	2.01500	2.570	3.649	4.0321	4.773	5.893	6.863
16	1.4390	1.943	2.4460	3.1420	3.7070	4.316	5.2070	5.958
17	1.4149	1.8946	2.3646	2.998	3.4995	4.2293	4.785	5.407
18	1.3968	1.8596	2.3060	2.8965	3.3554	3.832	4.5008	5.041
19	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498	3.6897	4.2968	4.780
110	1.3720	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693	3.5814	4.1437	4.586
111	1.363	1.795	2.201	2.718	3.105	3.496	4.024	4.437
112	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0845	3.4284	3.929	4.178
113	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.1123	3.3725	3.852	4.220
014	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.976	3.3257	3.787	4.140
115	1.3406	1.7530	2.1314	2.6025	2.9467	3.2860	3.732	4.072
116	1.3360	1.7450	2.1190	2.5830	2.9200	3.2520	3.6860	4.015
117	1.3334	1.7396	2.1098	2.5668	2.8982	3.2224	3.6458	3.965
118	1.3304	1.7341	2.100	2.5514	2.8784	3.1966	3.6105	3.921
119	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609	3.1737	3.5794	3.883
220	1.3253	1.7247	2.08600	2.5280	2.8453	3.1534	3.5518	3.849

Таблица 3 - Значения F - критерия Фишера при 5%-м уровне значимости

Основы теории эксперимента

$f_1 = N - l$	1	2	3	4	5	6	8	12	24	∞
$f_2 = N(m - 1)$										
1	161,45	199,50	215,72	224,57	230,17	233,97	238,89	243,91	249,04	254,3
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,37	19,41	19,45	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,84	8,74	8,64	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,04	5,91	5,77	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,82	4,68	4,53	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,15	4,00	3,84	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,73	3,57	3,41	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,44	3,28	3,12	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,23	3,07	2,90	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,07	2,91	2,74	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	2,95	2,79	2,61	2,40
12	4,75	3,88	3,49	3,26	3,11	3,00	2,85	2,69	2,50	2,30
13	4,67	3,80	3,41	3,18	3,02	2,92	2,77	2,60	2,42	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,70	2,53	2,35	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,64	2,48	2,29	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,59	2,42	2,24	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,55	2,38	2,19	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,51	2,34	2,15	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,48	2,31	2,11	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,45	2,28	2,08	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,42	2,25	2,05	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,40	2,23	2,03	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,38	2,20	2,00	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,36	2,18	1,98	1,73
25	4,24	3,38	2,99	2,76	2,60	2,49	2,34	2,16	1,96	1,71
26	4,22	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,32	2,15	1,95	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,30	2,13	1,93	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,44	2,29	2,12	1,91	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,54	2,43	2,28	2,10	1,90	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,27	2,09	1,89	1,62
35	4,12	3,26	2,87	2,64	2,48	2,37	2,22	2,04	1,83	1,57
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,18	2,00	1,79	1,51
45	4,06	3,21	2,81	2,58	2,42	2,31	2,15	1,97	1,76	1,48

