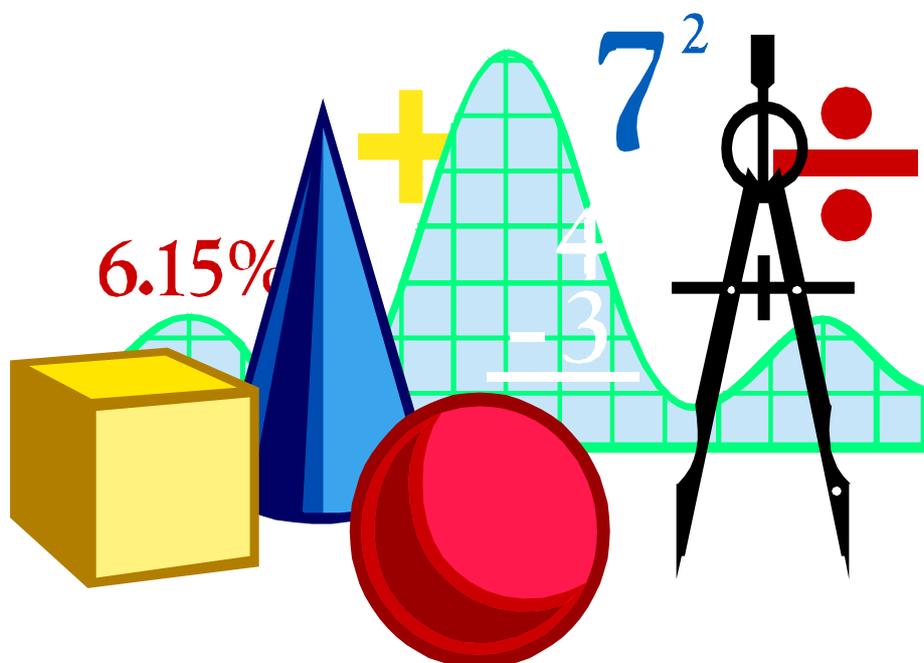


Владимирский государственный университет

**ПРОВЕДЕНИЕ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА  
ПРИ РАЗРАБОТКЕ СОСТАВА ШИХТЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА  
КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

**Методические указания к лабораторным занятиям  
по дисциплине “Статистические методы исследования шихт  
в стекольной промышленности”**



Владимир 2000

Министерство образования Российской Федерации  
Владимирский государственный университет  
Кафедра технологии полимерных и тугоплавких материалов

ПРОВЕДЕНИЕ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА  
ПРИ РАЗРАБОТКЕ СОСТАВА ШИХТЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА  
КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Методические указания к лабораторным занятиям по дисциплине  
“Статистические методы исследования шихт  
в стекольной промышленности”

Составитель  
И.А. Христофорова

Владимир 2000

УДК 519.2, 519.242, 666.3.

Рецензент  
Кандидат технических наук  
доцент Владимирского государственного университета  
*Н.Н. Барабанов*

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Владимирского государственного университета

**Проведение** активного эксперимента при разработке состава шихты для производства керамических изделий: Метод. указания к лабораторным занятиям по дисциплине “Статистические методы исследования шихт в стекольной промышленности” / Владим. гос. ун-т; Сост. И.А. Христофорова. Владимир, 2000. 24 с.

Дана методика расчета выходных параметров шихты, содержащей различное количество ингредиентов, с использованием плана Бокса-Бенкина размерности  $K = 3$  на практическом примере получения керамического материала. Использование активного эксперимента с математической обработкой получаемых результатов и прогнозированием свойств материалов в исследуемом факторном пространстве позволяет значительно сократить объем экспериментальных исследований, обеспечить получение достоверных результатов и оптимизировать составы с целью производства керамических изделий с заранее заданными свойствами.

Приведены варианты комплексных лабораторных работ с применением планирования эксперимента, включающие в себя изготовление керамических образцов, определение их свойств, математическую обработку полученных результатов, выбор оптимального состава шихты для получения керамического изделия с заданными свойствами.

Предназначены для студентов специальности 2508 - химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов всех форм обучения.

Табл. 16. Библиогр.: 7 назв.

УДК 519.2, 519.242, 666.3.

## ВВЕДЕНИЕ

Как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях, проводимых и на теоретическом, и на эмпирическом уровнях познания, для современной науки характерен системный подход к изучаемому явлению. Система определяется как ограниченное, взаимосвязанное противоречивым взаимодействием единства тел и предметов. В определении понятия “система” проявляется целевая ориентация этого понятия, рассчитанная на конкретное применение в рамках определенной системной теории для исследования и конструирования сложных объектов. Система определяется заданием системных объектов, их свойств и отношений между ними. Некоторые принципы такого определения можно пояснить на примере технологии производства керамических материалов как сложной технической системы.

Функцией такой системы является производство искусственного материала с таким комплексом свойств, в котором не только реализуются лучшие свойства компонентов, но и возникают новые свойства, обусловленные взаимодействием этих компонентов. Цель функционирования можно определить как достижение материалом оптимального качества и поддержание его на этом уровне с максимальной стабильностью при заданном объеме производства материала в течение времени  $\tau$  при ряде ограничений на функционирование системы. Так для получения оптимальных качественных характеристик материалов необходимо проведение ограничения по введению в композицию тех или иных ингредиентов, тогда как наработанная априорная информация свидетельствует о влиянии этих ингредиентов на повышение тех или других качественных показателей. В этом случае не учитывается взаимодействие отдельных ингредиентов, которое зачастую может иметь отрицательное влияние на достижение конечного положительного результата.

Поведение системы оценивается по величине ее *выходов*  $Y_j$  (уровни показателей качества; например: прочности при изгибе, водопоглощения, плотности получаемого керамического материала из шихты заданного состава), образующих поле поведения системы в пределах  $Y_{j \min} \leq Y_j \leq Y_{j \max}$ .

Целенаправленное изменение поля поведения среды осуществляется за счет управления *уровнями входов*  $X_i$  или факторов, образующих факторное пространство в пределах  $X_{i \min} \leq X_i \leq X_{i \max}$ , границы которого также определяются возможностями существования данного фактора или нормативом. Уровнями входов  $X_i$ , или факторами в данном конкретном случае, являются концентрации вполне конкретных ингредиентов смеси, которые

могут быть выражены в массовых частях компонентов, вводимых в шихту для получения керамического изделия.

Каждый из выходов системы  $Y_j$  связан с уровнями входов  $X_i$  объективно существующей зависимостью, называемой *уравнением состояния* системы:

$$\varphi\{Y_j, X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_K, \tau, \xi\} = 0, \quad (1)$$

для которого в технологических и других реальных системах неизвестны ни виды функции  $\varphi$ , ни граничные условия.

При изучении стохастических систем для определения их поведения могут быть использованы различные подходы. Одной из группы моделей является локально-интегральная полиномиальная модель, применяемая для решения практических задач, связанных с описанием и оптимизацией системы. Например, полином второго порядка (более высокий порядок применяется редко) от  $K$  факторов (независимых переменных) записывается в виде:

$$Y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ii} x_i^2 \pm \sum b_{ij} x_i x_j. \quad (2)$$

Коэффициенты уравнения регрессии (2) ( $b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij}$ ) можно интерпретировать как коэффициенты ряда Тейлора, т.е. как значения частных производных в точке, вокруг которой производится разложение неизвестной нам функции, задающей решение неизвестных нам дифференциальных уравнений. Коэффициенты могут быть определены по экспериментальным данным по методу наименьших квадратов. Величина  $Y$  является выходом системы и называется параметром оптимизации или функцией отклика ( $Y = f(x)$ ). Величины  $x_{i,j}$  являются независимыми переменными и называются факторами процесса.

В данных методических указаниях будет рассмотрен метод статистического планирования эксперимента на примере плана Бокса-Бенкина размерности  $K = 3$ . В качестве системы оптимизации предлагается рассмотреть керамические пористые материалы. Данные изделия широко применяются в виде строительных и огнеупорных материалов.

## **1. ПРОВЕДЕНИЕ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ РАЗРАБОТКЕ СОСТАВА ШИХТЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАНА БОКСА-БЕНКИНА РАЗМЕРНОСТИ $K = 3$**

В выбранном объекте исследования (составе шихты) содержится глина мстерского месторождения (общая формула  $mAl_2O_3 \cdot nSiO_2 \cdot pH_2O$ ), стеклобой листового стекла и доломит ( $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ ).

Ингредиенты композиции дробились в ступке, просеивались через сито № 0,063 и перемешивались. В готовую шихту вводилось 7% воды,

которой достаточно для полусухого формования изделий. На гидравлическом прессе при удельном давлении 10,0 МПа отпрессовывались образцы в виде балочек.

Далее керамические балочки обжигались в муфельной печи при температуре обжига 1000 °С, охлаждались и подвергались проверке по стандартным методикам на физико-механические характеристики (полная усадка, открытая пористость, водопоглощение, прочность при изгибе, кажущаяся плотность).

В процессе получения пористых керамических материалов на их качественные характеристики оказывают влияние концентрация глины, отощающего материала (стеклобоя) и порообразователя (доломита). При стабилизации технологических режимов производства керамических материалов: температуры обжига 1000 °С и удельного давления прессования 10,0 МПа - количество изменяемых факторов сводится к трем.

К реализации принимается  $D$ -оптимальный план Бокса-Бенкина размерности  $K = 3$ , позволяющий провести математико-статистическую обработку данных при варьировании трех компонентов на трех уровнях.  $D$ -оптимальные планы обеспечивают минимальный объем эллипсоида рассеивания оценок параметров, минимизируют максимальную дисперсию в заданной области плана, обладают свойством рототабельности и имеют наименьший определитель ковариационной матрицы. Свойство рототабельности сводится к тому, что точки матрицы планирования подбираются с обеспечением одинаковой точности предсказания значений функций отклика и независимости от направления исследования.

План Бокса-Бенкина представляет собой определенные выборки из полного факторного эксперимента типа  $3^K$ , где  $K$  – число факторов, равное трем, а 3 – число уровней (+1, 0, -1), на которых варьируется каждая переменная. Факторы и уровни их варьирования представлены в табл. 1. План Бокса-Бенкина включает число экспериментов, незначительно превышающее число определяемых констант в уравнении регрессии, и рекомендуется для использования полинома второго порядка при непоследовательном планировании. В табл. 2 представлен план Бокса-Бенкина размерности  $K = 3$ . Общее число опытов по плану Бокса-Бенкина для  $K = 3$  составляет:

$$N_{\text{общ}} = N + N_0 = 12 + 5 = 17, \quad (3)$$

где  $N_0$  - число опытов в центре плана.

Номер реализации опыта выбирался из таблицы случайных чисел с целью устранения временного дрейфа.

После проведения эксперимента были рассчитаны коэффициенты регрессии по расчетной матрице плана Бокса-Бенкина, приведенной в табл. 3.

**Таблица 1**

Факторы и уровни их варьирования

Фактор	Обозначение	Единицы измерения	Уровни варьирования факторов		
			верхний	нулевой	нижний
			Кодированное обозначение		
			+1	0	-1
1. Глина	$X_1$	мас.ч.	90	75	60
2. Стеклобой	$X_2$	мас.ч.	40	25	10
3. Доломит	$X_3$	мас.ч.	3	2	1

**Таблица 2**

План типа Бокса-Бенкина размерности  $K = 3$  (с одной центральной точкой)

№ п/п	№ реализации	Эксперимент в кодированных переменных			Эксперимент в натуральных переменных		
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	6	+	+	0	90	40	2
2	2	+	-	0	90	10	2
3	5	-	+	0	60	40	2
4	1	-	-	0	60	10	2
5	10	+	0	+	90	25	3
6	12	+	0	-	90	25	1
7	11	-	0	+	60	25	3
8	9	-	0	-	60	25	1
9	8	0	+	+	75	40	3
10	7	0	+	-	75	40	1
11	4	0	-	+	75	10	3
12	3	0	-	-	75	10	1
13	13	0	0	0	75	25	2
“	14	0	0	0	75	25	2
“	15	0	0	0	75	25	2
“	16	0	0	0	75	25	2
“	17	0	0	0	75	25	2

В уравнении регрессии (2)  $b_0 = Y_{cp}$ . Коэффициенты при квадратичных членах определяются по следующим формулам:

$$b_i = 0,125 \Sigma (iY); \quad (4)$$

$$b_{ii} = 0,25 \Sigma (iiY) + \rho_3; \quad (5)$$

$$\rho_3 = \rho_2 + \rho_1; \quad (6)$$

$$\rho_1 = -0,5 \Sigma (0Y); \quad (7)$$

$$\rho_2 = 0,1875 \Sigma (iiY), \quad (8)$$

где  $\Sigma (0Y)$  – сумма значений выхода системы;  $\Sigma (iiY)$  – сумма значений выхода системы  $ii$ -го вектор-столбца с учетом знака;  $\rho_3, \rho_2, \rho_1$  – расчетные коэффициенты.

**Т а б л и ц а 3**

Расчетная матрица плана Бокса-Бенкина размерности  $K = 3$

№ п/п	Значения выхода системы					Кодированное значение переменных									
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{23}$	
1	6,5	2,092	1,8	17,0	13,5	+	+	0	+	+	0	+	0	0	
2	9,4	2,067	1,2	5,3	19,4	+	-	0	+	+	0	-	0	0	
3	4,7	2,091	2,3	22,5	9,8	-	+	0	+	+	0	-	0	0	
4	9,7	2,055	0,8	8,2	19,9	-	-	0	+	+	0	+	0	0	
5	9,5	2,041	0,9	9,8	19,4	+	0	+	+	0	+	0	+	0	
6	8,4	2,069	0,8	10,2	17,4	+	0	-	+	0	+	0	-	0	
7	9,6	2,000	0,9	15,5	19,3	-	0	+	+	0	+	0	-	0	
8	7,7	2,074	1,1	16,5	15,9	-	0	-	+	0	+	0	+	0	
9	7,5	2,044	1,2	19,0	15,4	0	+	+	0	+	+	0	0	+	
10	6,9	2,063	1,8	19,2	14,2	0	+	-	0	+	+	0	0	-	
11	10,4	2,032	0,7	6,7	21,1	0	-	+	0	+	+	0	0	-	
12	9,2	2,068	0,7	7,3	18,9	0	-	-	0	+	+	0	0	+	
13	8,4	2,061	0,7	11,8	17,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
14	8,9	2,052	0,9	12,2	18,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15	8,8	2,065	0,8	12,7	18,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
16	8,6	2,054	0,8	13,2	17,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
17	7,7	2,093	1,1	12,7	16,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Примечание:  $Y_1$  - водопоглощение В, %;  $Y_2$  - кажущаяся плотность  $\rho$ , г/см<sup>3</sup>;  $Y_3$  - полная усадка  $U_{п}$ , %;  $Y_4$  - прочность при изгибе  $\sigma_{изг}$ , МПа;  $Y_5$  - открытая пористость  $\Pi_0$ , %.

Коэффициенты при взаимодействиях факторов  $b_{ij}$  рассчитываются по формуле

$$b_{ij} = 0,25 \Sigma (ijY), \quad (9)$$

где  $\Sigma (ijY)$  – сумма значений выхода системы  $ij$ -го вектор-столбца с учетом кодированного знака.

Среднее квадратичное значение пяти параллельных опытов в центральной точке плана (нулевой уровень) определится по формуле

$$Y_{cp0} = \frac{\sum_{i=1}^5 Y_i}{5}. \quad (10)$$

Среднеквадратичная дисперсия пяти параллельных опытов в центральной точке плана находится по формуле:

$$S^2_{cp\{Y0\}} = \frac{\sum_{i=1}^5 (Y_{cp0} - Y_i)^2}{N-1}, \quad (11)$$

где  $N$  – число опытов (в данном случае  $N = 5$ ).

Среднеквадратичное отклонение на нулевом уровне будет равно

$$S_{\{Y0\}} = \sqrt{S^2_{cp\{Y0\}}}. \quad (12)$$

## 2. РАСЧЕТ УРАВНЕНИЙ РЕГРЕССИИ

### 2.1. Расчет уравнения регрессии для $Y_1$ (водопоглощение $B$ , %)

Расчет начинаем вести с определения среднего значения водопоглощения на нулевом уровне (см. строки 13-17 табл. 3) по пяти параллельным опытам по формуле (10):

$$Y_{cp0} = (8,4+8,9+8,8+8,6+7,7) / 5 = 8,48 \text{ \%}.$$

По формуле (11) находим среднеквадратичную дисперсию:

$$S^2_{cp\{Y0\}} = \{(8,48-8,4)^2 + (8,48-8,9)^2 + (8,48-8,8)^2 + (8,48-8,6)^2 + (8,48-7,7)^2\} / (5-1) = 0,908/4 = 0,227,$$

а по формуле (12) среднеквадратичное отклонение

$$S_{\{Y0\}} = \pm \sqrt{0,227} = \pm 0,476.$$



Таблица 4

Расчетная матрица плана Бокса-Бенкина размерности  $K = 3$ 

№	План			Расчетная матрица									
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_i$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$
1	+	+	0	6,5	+6,5	+6,5	0	+6,5	+6,5	0	+6,5	0	0
2	+	-	0	9,4	+9,4	-9,4	0	+9,4	+9,4	0	-9,4	0	0
3	-	+	0	4,7	-4,7	+4,7	0	+4,7	+4,7	0	-4,7	0	0
4	-	-	0	9,7	-9,7	-9,7	0	+9,7	+9,7	0	+9,7	0	0
5	+	0	+	9,5	+9,5	0	+9,5	+9,5	0	+9,5	0	+9,5	0
6	+	0	-	8,4	+8,4	0	-8,4	+8,4	0	+8,4	0	-8,4	0
7	-	0	+	9,6	-9,6	0	+9,6	+9,6	0	+9,6	0	-9,6	0
8	-	0	-	7,7	-7,7	0	-7,7	+7,7	0	+7,7	0	+7,7	0
9	0	+	+	7,5	0	+7,5	+7,5	0	+7,5	+7,5	0	0	+7,5
10	0	+	-	6,9	0	+6,9	-6,9	0	+6,9	+6,9	0	0	-6,9
11	0	-	+	10,4	0	-10,4	+10,4	0	+10,4	+10,4	0	0	-10,4
12	0	-	-	9,2	0	-9,2	-9,2	0	+9,2	+9,2	0	0	+9,2
13	0	0	0	8,48	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				$\Sigma Y_i = 107,98$ $\rho_1 = -0,5\Sigma Y_i = -53,99$ $b_0 = Y_{13} = 8,48$	$\Sigma(+Y_i) = +33,8$ $\Sigma(-Y_i) = -31,7$ $(1Y) = 2,1$ $b_1 = 0,125$ x x (1Y) = 0,2625	$\Sigma(+Y_i) = +25,6$ $\Sigma(-Y_i) = -38,7$ $(2Y) = -13,1$ $b_2 = 0,125$ x x (2Y) = -1,6375	$\Sigma(+y_i) = +37,0$ $\Sigma(-y_i) = -32,2$ $(3Y) = +4,8$ $b_3 = 0,125$ x (3Y) = +0,6	$(11Y) = +65,5$ ; $(22Y) = +64,3$ ; $(33Y) = +69,2$ ; $\Sigma(iiY) = (11Y) + (22Y) + (33Y) = +199,0$ $\rho_2 = 0,1875 \cdot \Sigma(iiY) = 0,1875 \cdot 199,0 = 37,3125$ ; $\rho_3 = \rho_2 + \rho_1 = 37,3125 - 53,99 = -16,6775$ ; $0,25(11Y) = +16,375$ ; $0,25(22Y) = +16,075$ ; $0,25(33Y) = +17,3$ ; $b_{ii} = 0,25(iiY) + \rho_3$ ; $b_{11} = +16,375 - 16,6775 = -0,3025$ ; $b_{22} = +16,075 - 16,6775 = -0,6025$ ; $b_{33} = +17,3 - 16,6775 = +0,6225$	$\Sigma(+Y_i) = +16,2$ $\Sigma(-Y_i) = -14,1$ $(12Y) = +2,1$ $b_{12} = +0,525$	$\Sigma(+Y_i) = +17,2$ $\Sigma(-Y_i) = -18,0$ $(13Y) = -0,8$ $b_{ij} = 0,25 \cdot x(ijY)$ $b_{13} = -0,2$	$\Sigma(+Y_i) = +16,7$ $\Sigma(-Y_i) = -17,3$ $(23Y) = -0,6$ $b_{23} = -0,15$		

Примечание:  $\Sigma Y_i$  - сумма выходов системы;  $\Sigma(+Y_i)$  - сумма выходов системы со знаком "+";  $\Sigma(-Y_i)$  - сумма выходов системы со знаком "-"; (1Y) - сумма значений выходов (с учетом знака) для расчета коэффициента при  $x_1$ ; (2Y) - сумма значений выходов (с учетом знака) для расчета коэффициента при  $x_2$ ; (3Y) - сумма значений выходов (с учетом знака) для расчета коэффициента при  $x_3$ ;  $b_i = 0,125(iY)$ , с учетом знака. Расчет коэффициентов при квадратичных членах  $x_{ij}$  ведется следующим образом: (11Y), (22Y), (33Y) - суммы выходов системы квадратичного взаимодействия;  $\Sigma(iiY) = (11Y) + (22Y) + (33Y)$ ; расчет  $\rho_2$ ,  $\rho_3$ , коэффициентов  $b_{11}$ ,  $b_{22}$ ,  $b_{33}$  ведут по формулам (5) - (8); коэффициенты при  $x_{ij}$  рассчитывают по формуле (9).

Расчет коэффициентов уравнения регрессии проводится при использовании прикладных математических программ для ЭВМ, разработанных на кафедре канд. техн. наук Барабановым Н.Н., либо по бланк-матрице, представленной в табл. 4.

Исходя из расчетной бланк-матрицы (см. табл. 4) коэффициенты уравнения регрессии будут следующими:  $b_0 = 8,48$ ;  $b_1 = 0,2625$ ;  $b_2 = -1,6375$ ;  $b_3 = 0,6$ ;  $b_{11} = -0,3025$ ;  $b_{22} = -0,6025$ ;  $b_{33} = 0,6225$ ;  $b_{12} = 0,525$ ;  $b_{13} = -0,2$ ;  $b_{23} = -0,15$ .

Предварительно уравнение регрессии примет вид:

$$Y_1 = 8,48 + 0,2625x_1 - 1,6375x_2 + 0,6x_3 - 0,3025x_1^2 - 0,6025x_2^2 + 0,6225x_3^2 + 0,525x_1x_2 - 0,2x_1x_3 - 0,15x_2x_3 . \quad (13)$$

По полученному уравнению регрессии был проведен расчет значений выхода  $Y_{\text{ВЫХ}}$ , определена ошибка  $\Delta u$  и  $\Delta u^2$ , результаты приведены в табл. 5.  $\Delta u$  - отклонение от экспериментального значения, т.е. разница между экспериментальным и рассчитанным значением:

$$\Delta u = Y_i - Y_{\text{ВЫХ}}. \quad (14)$$

**Т а б л и ц а 5**

Расчет выхода системы по уравнению регрессии для  $Y_1$

Эксперименталь - ные значения выхода, $Y_i$	Рассчитанные зна- чения выхода, $Y_{\text{ВЫХ}}$	Отклонение от экспериментально- го, $\Delta u$	Квадратичное отклонение, $\Delta u^2$
6,5	6,725000	- 0,225000	0,050625
9,4	8,950000	+0,450000	0,202500
4,7	5,150000	- 0,450000	0,202500
9,7	9,475000	+0,225000	0,050625
9,5	9,462500	+0,037500	0,001406
8,4	8,662500	- 0,262500	0,068906
9,6	9,337500	+0,262500	0,068906
7,7	7,737500	- 0,037500	0,001406
7,5	7,312500	+0,187500	0,035156
6,9	6,412500	+0,487500	0,237656
10,4	10,887500	- 0,487500	0,237656
9,2	9,387500	- 0,187500	0,035156
8,48	8,480000	0	0

$$\Sigma \Delta u = 0$$

$$\Sigma \Delta u^2 = 1,1925$$

Рассчитанное значение выхода  $Y_{\text{ВЫХ}}$  в каждом опыте получаем по уравнению регрессии (13) путем умножения коэффициентов  $b_i, b_{ii}, b_{ij}$  на знак при  $x_i, x_{ii}, x_{ij}$  соответствующий данной строке опыта (см. в табл. 3). Приведем пример расчета  $Y_{\text{ВЫХ}}$  для 1 и 2-й строк расчетной матрицы (см. табл. 3).

$$\begin{aligned} \text{Для строки 1: } Y_{\text{ВЫХ}1} &= 8,48 + 0,2625 (+1) - 1,6375 (+1) + 0,6 (0) - \\ &- 0,3025 (+1) - 0,6025 (+1) + 0,6225 (0) + \\ &+ 0,525 (+1) - 0,2 (0) - 0,15 (0) = 8,48 + 0,2625 - \\ &- 1,6375 + 0 - 0,3025 - 0,6025 + 0 + 0,525 - 0 - 0 = \\ &= 8,48 + 0,2625 - 1,6375 - 0,3025 - 0,6025 + 0,525 = 6,725. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Для строки 2: } Y_{\text{ВЫХ}2} &= 8,48 + 0,2625 \cdot (+1) - 1,6375 \cdot (-1) + 0,6 \cdot (0) - \\ &- 0,3025 \cdot (+1) - 0,6025 \cdot (+1) + 0,6225 \cdot (0) + \\ &+ 0,525 \cdot (-1) - 0,2 \cdot (0) - 0,15 \cdot (0) = 8,48 + 0,2625 + \\ &+ 1,6375 + 0 - 0,3025 - 0,6025 + 0 - 0,525 - 0 - 0 = \\ &= 8,48 + 0,2625 - 1,6375 - 0,3025 - 0,6025 + 0,525 = 8,95. \end{aligned}$$

Данные значения заносятся в табл. 5 в графу  $Y_{\text{ВЫХ}}$ . Аналогично рассчитываются остальные значения выхода системы по каждой строке.

Для оценки значимости коэффициентов уравнения регрессии находились  $b_{\text{кр}}$  по формуле

$$b_{\text{кр}} = t \cdot S\{b\}, \quad (15)$$

где  $t$  – критерий Стьюдента для степени свободы  $f = n - 1 = 16$  и при вероятности превышения  $\alpha = 0,1$  равен 1,746 (прил. 1);  $S\{b\}$  – среднеквадратичная ошибка  $S\{b\} = T_i \cdot S\{y_0\}$ , где  $T_i$  – коэффициент корреляции. Расчет  $b_{\text{кр}}$  приведен в табл. 6.

Далее проводят регрессионный анализ модели, который представлен в табл. 7.

### Т а б л и ц а 6

Расчет ошибок в определении коэффициентов при  $S^2_{\text{ср}\{y_0\}} = 0,227$ ;  
 $S_{\{y_0\}} = \pm 0,476$ ;  $f = 16$ ;  $\alpha = 0,1$ ;  $t = 1,746$

Коэффициен- ты	Ошибка для коэффициентов уравнения регрессии			
	$b_0$	$b_i$	$b_{ii}$	$b_{ij}$
$T_i$	1,0000	0,3536	0,6614	0,5000
$S\{b\}$	0,4760	0,1683	0,3148	0,2380
$b_{\text{кр}}$	0,8310	0,2939	0,5496	0,4155

## Регрессионный анализ модели

Коэффициенты уравнения регрессии	Значение		
	$b_{нач}$	$b_{кр}$	$b_{кон}$
$b_0$	8,48	0,8310	8,48
$b_1$	0,2625	0,2939	0
$b_2$	-1,6375	0,2939	-1,6375
$b_3$	0,6	0,2939	0,6
$b_{11}$	-0,3025	0,5496	0
$b_{22}$	-0,6025	0,5496	-0,6025
$b_{33}$	0,6225	0,5496	0,6225
$b_{12}$	0,525	0,4155	0,525
$b_{13}$	-0,2	0,4155	0
$b_{23}$	-0,15	0,4155	0

Определение значимости коэффициентов уравнения регрессии проводят путем сравнения следующего неравенства: если начальный коэффициент  $b_i$  при  $x_i$  (берется из уравнения регрессии) больше по абсолютному значению  $b_{кр}$ , то  $b_i$  принимается за конечное значение коэффициента  $b_{кон}$  (т.е. если  $|b_{нач}| \geq |b_{кр}|$ , то  $b_{нач} = b_{кон}$ ). Но если  $|b_{нач}| \leq |b_{кр}|$ , то  $b_{кон} = 0$ ). Так из табл. 7 видно, что  $b_1$ ,  $b_{11}$  и  $b_{23}$  по абсолютному значению меньше чем  $b_{кр}$ , поэтому значения этих коэффициентов обнуляются.

Конечное значение  $b_0$  определяется значением на нулевом уровне, так как все квадратичные в конечном уравнении сохранены.

Уравнение регрессии в конечном итоге принимает вид:

$$Y_1 = 8,48 - 1,6375x_2 + 0,6x_3 - 0,6025x_2^2 + 0,6225x_3^2 + 0,525x_1x_2. \quad (17)$$

Расчетная средняя квадратичная дисперсия находится по формуле

$$S_{\Delta U}^2 = \Sigma \Delta u^2 / (n - 1), \quad (18)$$

где  $\Sigma \Delta u^2$  – сумма квадратичных отклонений по 13 опытам, берется из табл. 5,  $n$  – число опытов (в данном случае  $n = 13$ ).

Расчетное (экспериментальное) среднеквадратичное отклонение определяем по формуле

$$S_{\Delta U} = \sqrt{S_{\Delta U}^2}. \quad (19)$$

Тогда  $S_{\Delta U}^2 = 1,1925 / (13 - 1) = 0,099375$ . Расчетное среднеквадратичное отклонение равняется  $S_{\Delta U} = \pm 0,315$ . Среднеквадратичное отклонение на нулевом уровне равно  $S_{\{Y_0\}} = \pm 0,476$ . Адекватность уравнения регрессии оценивают по критерию Фишера  $F$ , однако по плану Бокса-Бенкина допустимость применения полиномиальной модели можно делать на основании анализа  $S_{\Delta U}^2$  без проверки адекватности. По критерию Фишера возможна такая ситуация, в которой модель неадекватна из-за малой ошибки эксперимента (прецизионный лабораторный эксперимент) или наоборот, когда модель является адекватной, а ошибка эксперимента очень велика (грубый эксперимент). В том и другом случае экспериментатор будет неудовлетворен такой моделью. Поэтому к использованию такой модели необходимо подходить очень осторожно [1]. Исходя из сказанного, принимаем, что при условии  $S_{\{Y_0\}} > S_{\Delta U}$  модель считать адекватной.

Аналогично ведется расчет уравнений регрессий для  $Y_2, Y_3, Y_4, Y_5$ .

### 3. АНАЛИЗ ПРОВЕДЕННЫХ РАСЧЕТОВ

В итоге, исходя из проведенных расчетов, получают систему квадратных уравнений.

Для оптимизации свойств керамических материалов необходимо по каждому уравнению рассчитать массив данных с заданным шагом изменения переменных ингредиентов  $x_i$ . Расчет массивов проводится либо с применением обычных калькуляторов, либо с использованием прикладных программ на ПЭВМ. Пример расчета части точек массива дан в прил.2. В данном примере представлены точки массива, соответствующие максимальному значению предела прочности при изгибе ( $Y_4$ ) и значениям выхода системы по  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_5$  в той же области массива. Из данных видно, что составу № 111 соответствует максимальное значение прочности при изгибе – 22,725 МПа. При этом значение водопоглощения равно 5,537%, кажущейся плотности – 2,065 г/см<sup>3</sup>, полной усадки – 2,223%, открытой пористости – 11,350%. Состав в данной точке массива будет следующий: в кодированных значениях –  $x_1 = -1,000$ ;  $x_2 = +1,000$ ;  $x_3 = +1,000$ ; в натуральных величинах – глина = 60 мас.ч.; стеклобой = 40 мас.ч.; доломит = 1 мас.ч.

## 4. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

### Лабораторная работа № 1

#### *Расчет уравнений регрессии по экспериментальным данным*

*Цель работы:* приобретение навыков по планированию эксперимента, математической обработке экспериментальных данных, и анализу полученных уравнений регрессии.

*Задание:* рассчитать уравнения регрессии для  $Y_2$ ,  $Y_3$ ,  $Y_4$ ,  $Y_5$  для представленного выше примера. Исходные данные для расчета взять в табл. 3. Проанализировать полученную систему уравнений.

### Лабораторная работа № 2

#### *Математическое моделирование композиций для получения керамических материалов*

*Цель работы:* приобретение навыков по планированию эксперимента; проведение экспериментальных исследований по влиянию состава шихты на свойства получаемых керамических изделий.

*Задание:*

1. Изучить теоретические основы работы, ознакомиться с методиками подготовки шихты и получения керамических изделий, освоить технику безопасности при выполнении лабораторной работы (прил. 3).

2. Получить у преподавателя состав керамической композиции и технологические режимы формования материала.

3. Рассчитать массу исходных компонентов.

4. Приготовить шихту для прессования.

5. Сформовать изделия в виде балочек на гидравлическом прессе.

6. Произвести обжиг балочек.

7. Определить свойства керамики по заданию преподавателя.

8. Рассчитать уравнения регрессии для выходов системы, оценить значимость коэффициентов и адекватность полученной модели.

9. По адекватным моделям провести расчет массива выходов системы, определить экстремальные области и сделать вывод об оптимальном составе шихты для получения керамических изделий с заданными свойствами.

10. Составить отчет о проделанной работе.

технические весы; разновесы; штангенциркуль; стеклянная посуда; песчаная баня; гидравлический пресс; муфельная печь для обжига; глина мстерского месторождения; отошитель (стеклобой, шамот или др.), доломит; дистиллированная вода.

*Методика проведения эксперимента представлена для всех вариантов:*

1. Ввести в бланк-матрицу плана Бокса-Бенкина размерности  $K = 3$  кодированные и натуральные значения переменных.

2. Рассчитать и приготовить шихту для изготовления керамических образцов. Состав шихты: глина мстерского месторождения, отошитель (стеклобой) и доломит.

3. Шихту растереть в ступке и просеять через сито № 0,063.

4. Добавить 7% воды (для полусухого формования изделий).

5. Отпрессовать изделия в виде балочек или дисков на гидравлическом прессе при давлении прессования 10,0 МПа.

6. Провести обжиг балочек при температуре 1000 °С.

7. Определить свойства полученных образцов.

8. В расчетную бланк-матрицу плана Бокса-Бенкина внести значение выхода системы (отдельно по каждому определяемому показателю) с учетом соответствующего знака, провести расчет коэффициентов уравнения регрессии, определить их значимость. Провести расчет выхода системы по математической модели и определить ее адекватность. При условии адекватности модели провести расчет массива и определить области экстремальных значений выходов.

## ВАРИАНТЫ

**Вариант 1:** исходные данные к лабораторной работе указаны в табл. 8.

**Таблица 8**

Факторы и уровни их варьирования

Фактор	Обозначение	Единицы измерения	Уровни варьирования факторов		
			верхний	нулевой	нижний
			Кодированное обозначение		
			+1	0	-1
1. Глина	$X_1$	мас.ч.	90	75	60
2. Стеклобой	$X_2$	мас.ч.	40	25	10
3. Доломит	$X_3$	мас.ч.	10	7,5	5

**Вариант 2:** исходные данные к лабораторной работе указаны в табл. 9.

**Таблица 9**

Факторы и уровни их варьирования

Фактор	Обозначение	Единицы измерения	Уровни варьирования факторов		
			верхний	нулевой	нижний
			Кодированное обозначение		
			+1	0	-1
1. Глина	$X_1$	мас.ч.	90	75	60
2. Стеклобой	$X_2$	мас.ч.	40	25	10
3. Доломит	$X_3$	мас.ч.	20	15	10

**Вариант 3:** исходные данные к лабораторной работе указаны в табл. 10.**Таблица 10**

Факторы и уровни их варьирования

Фактор	Обозначение	Единицы измерения	Уровни варьирования факторов		
			верхний	нулевой	нижний
			Кодированное обозначение		
			+1	0	-1
1. Глина	$X_1$	мас.ч.	90	75	60
2. Стеклобой	$X_2$	мас.ч.	40	25	10
3. Доломит	$X_3$	мас.ч.	30	25	20

**Вариант 4:** исходные данные к лабораторной работе указаны в табл. 11.

В качестве отощителя взять шамот.

**Таблица 11**

Факторы и уровни их варьирования

Фактор	Обозначение	Единицы измерения	Уровни варьирования факторов		
			верхний	нулевой	нижний
			Кодированное обозначение		
			+1	0	-1
1. Глина	$X_1$	мас.ч.	90	75	60
2. Шамот	$X_2$	мас.ч.	40	25	10
3. Доломит	$X_3$	мас.ч.	3	2	1

**Вариант 5:** исходные данные к лабораторной работе указаны в табл. 12.

**Таблица 12**

Факторы и уровни их варьирования

Фактор	Обозначение	Единицы измерения	Уровни варьирования факторов		
			верхний	нулевой	нижний
			Кодированное обозначение		
			+1	0	-1
1. Глина	$X_1$	мас.ч.	90	75	60
2. Шамот	$X_2$	мас.ч.	40	25	10
3. Доломит	$X_3$	мас.ч.	10	7,5	5

**Вариант 6:** исходные данные к лабораторной работе указаны в табл. 13.**Таблица 13**

Факторы и уровни их варьирования

Фактор	Обозначение	Единицы измерения	Уровни варьирования факторов		
			верхний	нулевой	нижний
			Кодированное обозначение		
			+1	0	-1
1. Глина	$X_1$	мас.ч.	90	75	60
2. Шамот	$X_2$	мас.ч.	40	25	10
3. Доломит	$X_3$	мас.ч.	20	15	10

**Вариант 7:** исходные данные к лабораторной работе указаны в табл. 14.**Таблица 14**

Факторы и уровни их варьирования

Фактор	Обозначение	Единицы измерения	Уровни варьирования факторов		
			верхний	нулевой	нижний
			Кодированное обозначение		
			+1	0	-1
1. Глина	$X_1$	мас.ч.	90	75	60
2. Шамот	$X_2$	мас.ч.	40	25	10
3. Доломит	$X_3$	мас.ч.	30	25	20

**Вариант 8:** исходные данные к лабораторной работе - факторы и уровни их варьирования получить у преподавателя.

**Задание по НИРС и УИРС:** провести планирование эксперимента следующих систем: глина боголюбовского месторождения - отощитель - доломит; глина боголюбовского месторождения - отощитель - мел; глина боголюбовского месторождения - отощитель - сода; глина боголюбовского месторождения - отощитель - известняк мелиховского карьера. Найти оптимальные составы шихты для получения теплоизоляционных материалов.

### ***Контрольные вопросы к лабораторным работам***

1. Определение среднеквадратичной ошибки эксперимента.
2. Вероятность свершения события. Определение доверительного интервала.
3. Критерий Стьюдента.
4. Критерий Кохрена.
5. Проверка воспроизводимости результатов.
6. Понятие факторного эксперимента.
7. Что такое функции отклика, факторы процесса ?
8. Чем характеризуется  $D$ -оптимальность планов ?
9. Что такое рототабельность плана ?
10. В чем особенность плана Бокса-Бенкина размерности  $K = 3$  ?
11. Ортогональность плана. Что такое центральная точка плана ?
12. Как определяется среднее значение выхода системы и ее дисперсия ?
13. Какова методика расчета уравнения регрессии, что оно показывает ?
14. Как оценивается значимость коэффициентов уравнения регрессии ?
15. Как определяется адекватность полученного уравнения регрессии?
16. Методика расчета массива выхода системы.
17. Экстремальные значения выхода системы.
18. Как производят выбор оптимального состава шихты для получения керамического изделия с заданными свойствами?

**вероятность превышения которых равна  $\alpha$**

Степень свободы $f$	Вероятность превышения $\alpha$					
	0,5	0,4	0,2	0,1	0,05	0,02
1	1,000	1,376	3,078	6,314	12,706	31,821
2	0,816	1,061	1,886	2,920	4,303	6,965
3	0,865	0,978	1,638	2,353	3,182	4,541
4	0,741	0,941	1,533	2,132	2,776	3,747
5	0,727	0,920	1,476	2,015	2,571	3,365
6	0,718	0,906	1,440	1,943	2,447	3,143
7	0,711	0,896	1,415	1,895	2,365	2,998
8	0,706	0,889	1,397	1,860	2,306	2,896
9	0,703	0,883	1,383	1,833	2,262	2,821
10	0,700	0,879	1,372	1,812	2,228	2,764
11	0,697	0,876	1,363	1,796	2,201	2,718
12	0,695	0,873	1,356	1,782	2,179	2,681
13	0,694	0,870	1,350	1,771	2,160	2,650
14	0,692	0,868	1,343	1,761	2,146	2,624
15	0,691	0,866	1,341	1,753	2,131	2,602
16	0,690	0,865	1,337	1,746	2,120	2,583
17	0,689	0,863	1,333	1,740	2,110	2,567
18	0,688	0,862	1,330	1,734	2,101	2,552
19	0,688	0,861	1,328	1,729	2,093	2,539
20	0,687	0,860	1,325	1,725	2,086	2,528
21	0,686	0,859	1,323	1,721	2,080	2,518
22	0,686	0,858	1,321	1,717	2,074	2,508
23	0,685	0,858	1,319	1,714	2,069	2,500
24	0,685	0,857	1,318	1,711	2,064	2,492
25	0,684	0,856	1,316	1,708	2,060	2,485
26	0,684	0,856	1,315	1,706	2,056	2,479
27	0,684	0,855	1,314	1,703	2,052	2,473
28	0,683	0,855	1,313	1,701	2,048	2,467
29	0,683	0,854	1,311	1,699	2,045	2,462
30	0,683	0,854	1,310	1,697	2,042	2,457
60	0,679	0,848	1,296	1,671	2,000	2,390
120	0,677	0,845	1,289	1,658	1,980	2,358
$\infty$	0,674	0,842	1,282	1,645	1,960	2,326

**из системы: глина - стеклобой - доломит**

Функции отклика представлены в таблице.

**Зависимость свойств керамического материала от изменения концентрации ингредиентов композиции**

Состав	Кодированные значения $x_i$			Функции отклика уравнений регрессии				
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$Y_1, \%$	$Y_2, \text{г/см}^3$	$Y_3, \%$	$Y_4, \text{МПа}$	$Y_5, \%$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
99	-1,000	0,600	1,000	8,388	2,065	1,420	19,705	16,074
100	-1,000	0,800	-1,000	6,187	2,065	1,894	21,200	12,661
101	-1,000	0,800	-0,800	6,123	2,065	1,931	21,200	12,476
102	-1,000	0,800	-0,600	6,108	2,065	1,955	21,200	12,681
103	-1,000	0,800	-0,400	6,144	2,065	1,965	21,200	12,376
104	-1,000	0,800	-0,200	6,229	2,065	1,961	21,200	12,461
105	-1,000	0,800	0,000	6,364	2,065	1,944	21,200	12,636
106	-1,000	0,800	0,200	6,549	2,065	1,913	21,200	12,901
107	-1,000	0,800	0,400	6,784	2,065	1,869	21,200	13,256
108	-1,000	0,800	0,600	7,068	2,065	1,811	21,200	13,701
109	-1,000	0,800	0,800	7,403	2,065	1,739	21,200	14,236
110	-1,000	0,800	1,000	7,787	2,065	1,654	21,200	14,861
<b>111</b>	<b>-1,000</b>	<b>1,000</b>	<b>-1,000</b>	<b>5,537</b>	<b>2,065</b>	<b>2,223</b>	<b>22,725</b>	<b>11,350</b>
112	-1,000	1,000	-0,800	5,473	2,065	2,254	22,725	11,165
113	-1,000	1,000	-0,600	5,459	2,065	2,271	22,725	11,070
114	-1,000	1,000	-0,400	5,495	2,065	2,275	22,725	11,065
115	-1,000	1,000	-0,200	5,580	2,065	2,268	22,725	11,150
113	-1,000	1,000	0,000	5,715	2,065	2,243	22,725	11,325
117	-1,000	1,000	0,200	5,900	2,065	2,206	22,725	11,590
118	-1,000	1,000	0,400	6,135	2,065	2,155	22,725	11,945
119	-1,000	1,000	0,600	6,419	2,065	2,091	22,725	12,390
120	-1,000	1,000	0,800	6,753	2,065	2,014	22,725	12,925
121	-1,000	1,000	1,000	7,137	2,065	1,923	22,725	13,550
122	0,000	-1,000	-1,000	9,537	2,065	0,487	6,635	19,600
...	...	...	...	...	...	...	...	...

*Примечание:*  $Y_1$  - В, %;  $Y_2$  -  $\rho_{\text{каж}}$ , г/см<sup>3</sup>;  $Y_3$  -  $U_{\text{п}}$ , %;  $Y_4$  -  $\sigma_{\text{изг}}$ , МПа;  $Y_5$  -  $\Pi_0$ , %;  $x_1$  - глина;  $x_2$  - стеклобой;  $x_3$  - доломит

Для выполнения лабораторных работ допускаются лица, изучившие правила безопасной работы в шихтно-печном отделении кафедры.

1. Студенты могут находиться в шихтно-печном отделении только в присутствии преподавателя.

2. Работающий в шихтно-печном отделении должен соблюдать правила пожарной безопасности, правила личной гигиены, должен уметь оказывать доврачебную помощь, а в случае травмирования, обнаружения неисправностей, влияющих на безопасность работы, немедленно сообщить заведующему лабораторией или заведующему кафедрой.

3. Перед началом работы студент обязан:

3.1. Включить вентиляцию.

3.2. Проверить наличие и исправность зануления корпуса печи, трансформатора, оборудования, ограждений и пусковых устройств.

3.3. Надеть предусмотренную спецодежду и иметь при себе индивидуальные средства защиты (очки, респиратор, рукавицы).

3.4. Подготовить необходимые инструменты и приспособления.

4. При неподготовленности рабочего места - к работе не приступать.

5. Во время работы в шихтно-печном отделении работающий обязан:

5.1. Выполнять только порученную работу.

5.2. Не отвлекаться и не отвлекать других.

5.3. По всем вопросам, возникающим в ходе работы, обращаться к преподавателю или инженеру.

6. При составлении шихты для варки стекол и изготовления керамических и ситалловых изделий нужно знать, что работы, связанные с измельчением (дробление, помол, растирание) материалов, содержащих оксиды кремния, титана, кадмия, свинца, алюминия и др., проводить с принятием всех мер предосторожности (респиратор, очки, перчатки), так как пыль и аэрозоли этих веществ являются исключительно опасными, способными вызывать такие заболевания, как силикоз дыхательных путей, интоксикацию организма, а при некоторых условиях могут явиться причиной взрывов и пожаров.

7. При варке стекол и ситаллов:

7.1. Строго соблюдать температурные режимы, заданные технологическими параметрами.

7.2. Загрузку и выгрузку тиглей проводить специальными щипцами.

7.3. При разогреве, печи открывать только в синих или дымчатых очках.

22

7.4. При выгрузке из печи горячие тигли ставить на площадку из негорючих материалов.

8. При работе на прессах:

8.1. Не допускать утечки масла из гидросистемы пресса в местах присоединения маслопровода.

8.2. Испытание высокопрочных хрупких образцов производить с защитными кожухами.

8.3. В случае неполадок, либо неисправностей пресса РН-М 100а, которые могут вызвать повреждение пресса или же угрожают жизни и здоровью обслуживающих, следует немедленно нажать кнопку “предохранительный выключатель”.

8.4. Запрещается смазывать части пресса на ходу.

8.5. Запрещается эксплуатировать пресс при давлении, превышающем указанное на шкале.

8.6. Запрещается производить переключение диапазонов пресса, когда рабочая стрелка силоизмерителя показывает нагрузку.

9. При возникновении аварийной ситуации работающий обязан прекратить работу, немедленно отключить электропитание с помощью рубильника, предпринять меры к устранению причины возникновения аварийной ситуации, доложить о случившемся заведующему кафедрой или заведующему лабораторией.

10. При несчастных случаях немедленно поставить в известность преподавателя, заведующего лабораториями и заведующего кафедрой, после чего пострадавший направляется в медпункт. При ранении острыми предметами или стеклом необходимо удалить осколки, выступающие из ран, смазать йодом кожу вокруг раны, наложить стерильную повязку и отправить пострадавшего в медпункт. При поражении электрическим током, если пострадавший не в состоянии освободиться от его действия, необходимо немедленно отключить ток и освободить пострадавшего. В случае, если пострадавший потерял сознание и не дышит, нужно незамедлительно вызвать врача и до его прибытия сделать искусственное дыхание. При отравлениях пострадавшего немедленно вывести его на свежий воздух. При термических и электрических ожогах нельзя касаться руками обожженных участков кожи и вскрывать пузыри. При небольших по площади ожогах первой и второй степени положить на обожженный участок кожи стерильную повязку. При тяжелых и обширных ожогах пострадавшего завернуть в ткань, обожженное лицо закрыть стерильной марлей. При ожогах глаз следует делать холодные примочки из раствора борной кислоты и немедленно направить пострадавшего к врачу. В случае механического повреждения глаз следует немедленно обратиться к врачу.

## **РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Финансы и статистика, 1981. 263 с.

2. Деденко Л.Г., Керженцев В.В. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента. М.: МГУ, 1977. 112 с.
3. Матушкин Н.Н. Обработка результатов измерений и планирование эксперимента: Курс лекций. Пермь: ППИ, 1977. 46 с.
4. Гришин В.К. Статистические методы анализа и планирования экспериментов. М.: МГУ, 1975. 128 с.
5. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине “Основы технологии тугоплавких материалов” / Влад. гос. ун-т; Э.П.Сысоев. Владимир, 1998. 76 с.
6. Технология силикатов / Л.Г.Мельниченко, Б.П.Сахаров, Н.А.Сидоров; Под ред. М.А.Матвеева. М.: Высш. шк., 1969. 360 с.
7. Инструкция по охране труда для сотрудников и студентов при выполнении работ в шихтно-печном отделении кафедры технологии полимерных и тугоплавких материалов № 16 -”о”. Владимир: ВлГУ, 1999. 5 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ПРОВЕДЕНИЕ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ РАЗРАБОТКЕ СОСТАВА ШИХТЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАНА БОКСА-БЕНКИНА РАЗМЕРНОСТИ $K = 3$ .....	4
2. РАСЧЕТ УРАВНЕНИЙ РЕГРЕССИИ.....	8
Расчет уравнения регрессии для $Y_1$ (водопоглощение $B$ , %).....	8
3. АНАЛИЗ ПРОВЕДЕННЫХ РАСЧЕТОВ.....	13
4. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ.....	14
Лабораторная работа № 1. Расчет уравнений регрессии по экспериментальным данным.....	14
Лабораторная работа № 2. Математическое моделирование композиций для получения керамических материалов.....	14
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	19
Приложение 1. Абсолютные значения коэффициента Стьюдента $t$ , вероятность превышения которых равна $\alpha$ .....	19
Приложение 2. Оптимизация композиций для получения керамических изделий из системы: глина - стеклобой - доломит.....	21
Приложение 3. Техника безопасности при выполнении лабораторных работ.....	22
РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	23

ПРОВЕДЕНИЕ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА  
ПРИ РАЗРАБОТКЕ СОСТАВА ШИХТЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА  
КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания к лабораторным занятиям  
по дисциплине “Статистические методы исследования шихт  
в стекольной промышленности”

Составитель  
ХРИСТОФОРОВА Ирина Александровна

Ответственный за выпуск - заведующий кафедрой профессор А.Д.Митрофанов

Редактор Е.А.Амирсейидова  
Корректор О.В.Чезганова

Изд. лиц. № 020275 от 13.11.96. Подписано в печать 07.02.2000.  
Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс. Печать  
офсетная. Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,52. Тираж 85 экз.

Заказ

Владимирский государственный университет.  
Подразделение оперативной полиграфии  
Владимирского государственного университета.  
Адрес университета и подразделения оперативной полиграфии:  
600026, Владимир, ул. Горького, 87.