

**ГВУЗ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**



**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ТЕХНИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА»**

Донецк
2016

**ГВУЗ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра «Обогащение полезных ископаемых»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ТЕХНИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА»**

**(для студентов специализации "Обогащение полезных ископаемых"
специальности "Горное дело")**

Утверждено
научно-издательским советом ДонНТУ

Протокол № 3 от 17 мая 2016 г.

Утверждено на заседании
методической комиссии по специальности
"Обогащение полезных ископаемых"

Протокол № 2 от 8 февраля 2016 г.

Донецк
2016

УДК 622.7

Методические указания по изучению курса "Техника физического эксперимента" для студентов специальности «Горное дело», специализации «Обогащение полезных ископаемых» / сост. В.Г. Самойлик – Донецк: ДонНТУ, 2016. – 18 с.

Представлено краткое содержание дисциплины "Техника физического эксперимента".

Изложена рабочая программа курса, даны указания к изучению его разделов, приведены варианты контрольных заданий.

Составитель: доц. Самойлик В. Г.

Рецензенты: доц., к.т.н. Корчевский А. Н.

проф., к.т.н. Бредихин В. Н.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Курс "Техника физического эксперимента" изучается в соответствии с рабочей программой подготовки специалистов специальности "Обогащение полезных ископаемых".

Целью преподавания дисциплины является подготовка специалиста, обладающего глубоким пониманием теоретических и практических основ методов исследования полезных ископаемых, технологических процессов обогащения.

При изучении дисциплины студент получает большой объем информации. Поэтому для усвоения материала необходимо вести краткий конспект.

Основная цель составления конспекта - собрать в сжатой форме информацию по предмету.

В конспекте стоит записывать основные определения и понятия, выводы формул, модели технологических процессов. Особое внимание следует обратить на моделирование технологических процессов обогащения, методы планирования экспериментов и оценки полученных экспериментальных данных.

При составлении конспекта следует руководствоваться программой, методическими указаниями и контрольными вопросами. Необходимо предостеречь студентов от переписывания из книг большого объема текста. В таком конспекте трудно ориентироваться. Необходимо помнить, что речь инженера - чертежи, график, эскиз, формула и руководствоваться этим при составлении конспекта.

После изучения материала каждого раздела следует осуществить самоконтроль знаний, то есть ответить на контрольные вопросы. Материал можно считать усвоенным, если студент может ответить на все вопросы без помощи конспекта и книги. Очень важно при этом проявить творческий подход к делу, что может найти выражение в следующем:

- приводится несколько примеров;

- для ответа привлекается информация из дополнительных источников, личного опыта и личного творческого поиска;

- вносятся предложения по использованию новых методов проведения физического эксперимента и обработки полученных данных.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные физические величины и методы их измерения, классификацию погрешностей измерения, основы физического моделирования процессов, физико-химические методы исследования состава и физических свойств полезных ископаемых.

После завершения курса студент должен приобрести навыки анализа различных технических решений, уметь правильно моделировать технологический процесс обогащения, проводить исследования полезных ископаемых на обогатимость, эффективно планировать физические эксперименты и обрабатывать полученные экспериментальные данные.

Курс базируется на знании основных положений философии, математики, физики, химии, теоретической механики, технологии горного производства, переработки и комплексного использования минерального сырья.

2. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ

2.1 Физические величины

Физическая величина. Числовое значение. Единица измерения: независимые, производные, кратные и дольные. Уравнение связи между физическими величинами. Уравнения между численными значениями. Метрическая система мер. Международная система единиц.

При проработке вступительной части курса следует осознать, что изучение физических явлений и закономерностей, а также использование этих закономерностей в практике связано с измерением физических величин. Между физическими величинами существуют качественные и количественные зависимости, закономерная связь, которые могут быть выражены в виде математических формул. Создание формул связано с математическими действиями над физическими величинами.

Также следует обратить внимание на разнообразие единиц измерения физических величин, их размерность, современные системы единиц.

Литература [1], [2].

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что обозначает термин «физическая величина»?
2. Какими способами можно получить единицу измерений физической величины?
3. В чем заключается отличие уравнений между физическими величинами и численными значениями?
4. Охарактеризуйте метрическую систему мер. Для каких целей она была создана?
5. Перечислите основные единицы Международной системы единиц (СИ).

2.2 . Измерение физических величин

Прямые, косвенные, совокупные и совместные измерения. Погрешности измерений: методические, инструментальные и субъективные. Классификация погрешностей измерения. Способы исключения систематических ошибок из результатов измерений. Меры с постоянным и переменным значением. Условные меры. Компарирующие приборы. Показывающие приборы. Интегрирующие приборы. Действительное и номинальное значение меры. Погрешность показаний прибора. Порог чувствительности измерительного прибора. Классы точности приборов. Динамическая характеристика измерительного прибора. Преобразование Лапласа. Передаточные функции. Частотная характеристика измерительного прибора. Спектральная плотность.

Дискретное измерение технологических параметров. Теорема Котельникова. Периодичность измерения.

При изучении данного раздела необходимо усвоить основные методы измерения физических величин, разобраться в причинах возникновения погрешностей измерений и знать их классификацию.

Также необходимо разобраться в вопросе классификации мер и измерительных приборов, познакомиться с основными их свойствами, классами точности приборов.

Особое внимание необходимо уделить изучению частных характеристик процессов измерений: динамической характеристике, передаточной функции, частотной характеристике, спектральной плотности.

Литература [1-3].

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем отличаются прямые измерения от косвенных?
2. Приведите классификацию погрешностей измерения.
3. Перечислите способы исключения систематических ошибок из результатов измерений.
4. Что такое «мера»? Классификация мер.
5. Охарактеризуйте группы измерительных приборов.
6. Каким выражением определяется класс точности прибора?
7. Дайте определение динамической характеристике измерительного прибора.
8. Раскройте суть теоремы Котельникова.

2.3. Исследование вещественного состава полезных ископаемых

Определение параметров исходного сырья как объекта обогащения. Минералогический анализ. Анализ гранулометрического состава полезного ископаемого. Фракционный анализ. Исследование физических и технологических характеристик минералов и руд. Методы определения минералогического состава полезного ископаемого: оптический, химический анализ, люминесцентный анализ, спектральный анализ, рентгенометрических фазовый анализ, термический анализ. Исследование физических свойств минералов. Действительная плотность. Насыпная плотность. Влажность. Сыпучесть. Магнитная восприимчивость. Электрическая проводимость. Прочность. Абразивность. Физико-химические методы анализа вещественного состава. Спектральный анализ. Фотометрический анализ. Люминесцентный анализ. Электрохимические методы анализа.

При изучении этого раздела следует осознать, что выбор наиболее рациональной схемы обогащения полезных ископаемых сложного вещественного состава возможно только на основе детального исследования их состава и взаимосвязи главных минеральных компонентов.

Необходимо понять назначение и сущность каждого метода определения вещественного состава и физических свойств полезных ископаемых.

Литература [4, 9-12].

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Перечислите ряд инструментальных методов, применяемых для идентификации минералов.
2. Как проводится анализ гранулометрического состава полезного ископаемого?
3. Для чего проводят фракционный анализ исходного материала?
4. Перечислите основные физические и технологические характеристики минералов и руд.
5. Какими методами можно определить минералогический состав полезных ископаемых?
6. Как определяется действительная плотность минерального сырья?
7. Для чего используют показатели «насыпная плотность» и «сыпучесть»?
8. Опишите методику определения объёмной магнитной восприимчивости.
9. Охарактеризуйте методы измерения объёмной проводимости твёрдых веществ.
10. Какими методами оценивается абразивность горных пород?
11. Перечислите физико-химические методы анализа вещественного состава полезных ископаемых.

2.4. Исследование полезных ископаемых на обогатимость

Цель и задачи проведения исследований полезных ископаемых на обогатимость. Основные этапы исследования полезных ископаемых на обогатимость. Поиск априорной информации. Стадии технологических исследований на обогатимость.

Исследование полезных ископаемых на обогатимость представляет собой комплекс различных испытаний: исследование вещественного состава полезного ископаемого, крупности и характера вкрапления полезных минералов, разработку технологии обогащения выбранными методами и определение технологических показателей с учётом комплексного использования сырья и охраны окружающей среды.

При изучении этого раздела необходимо усвоить основные этапы исследования полезных ископаемых на обогатимость, разобраться какие цели ставятся на каждой стадии исследований.

Литература [4, 11, 12].

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Цель проведения исследований полезных ископаемых на обогатимость?
2. Для чего проводятся полупромышленные и промышленные исследования?
3. Охарактеризуйте основные этапы исследования полезных ископаемых на обогатимость.
4. Какие операции включает в себя сбор априорной информации об объекте исследований?
5. Раскройте принцип составления схемы проведения исследований на обогатимость.

2.5. Процесс обогащения как объект исследований

Взаимосвязь технологических факторов. Причины неопределённости и непредсказуемости поведения процесса обогащения. Применение методов математической статистики для анализа технологических процессов. Активный эксперимент. Пассивный эксперимент. Статистические методы обработки полученной информации. Дисперсионный, корреляционный и регрессионный анализы. Применение теории графов для исследования технологических процессов. Понятие математической модели. Аналитические и эмпирические методы подходов к получению моделей. «Чёрный ящик». Теоретическое исследование физической системы. Статические и динамические математические модели. Закономерности разделения минералов в наиболее распространённых процессах. Общие сведения о сепарационных характеристиках технологических процессов обогащения. Исследования технологических схем обогащения минерального сырья.

Изучение этого раздела потребует от Вас освежить в памяти знания по физике и математике. Вам необходимо разобраться в сущности применения методов математической статистики для анализа технологических процессов, усвоить особенности моделирования процессов обогащения, закономерности разделения минералов.

Литература [3, 5, 9, 11, 13].

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Укажите основные причины неопределённости и непредсказуемости поведения процессов обогащения.
2. Для чего используются методы математической статистики при исследовании технологических процессов?
3. Укажите различия между активным и пассивным экспериментами.
4. В каких ситуациях неизбежен пассивный эксперимент?
5. Опишите суть теории графов.

6. Опишите принцип моделирования процесса с использованием «чёрного ящика».

7. Раскройте закономерности разделения минералов при фракционном анализе.

8. Как определяются сепарационные характеристики технологических процессов обогащения?

2.6. Статистические методы оценки экспериментальных данных

Последовательность статистического исследования процесса обогащения полезного ископаемого. Нормальный закон распределения (закон Гаусса). Среднее квадратическое отклонение. Математическое ожидание. Закон сложения дисперсий. Доверительный интервал. Ошибка воспроизводимости. Нулевая гипотеза. Критерии проверки статистической гипотезы. Критерий Стьюдента (t-критерий). Сравнение средних значений. Сравнение сопряжённых пар. Последовательный анализ Вальда. Критерий Фишера (F-критерий). Парное сравнение дисперсий. Критерий Кохрена (G-критерий). Сравнение нескольких дисперсий. Критерий Пирсона (χ^2 -критерий). Сравнение распределений. Предмет дисперсионного анализа и условия его выполнения. Однофакторный дисперсионный анализ. Проверка нулевой гипотезы о равенстве групповых средних. Сравнение факторной и остаточной дисперсии. Двухфакторный дисперсионный анализ. Статистическое исследование промышленного процесса. Назначение корреляционного анализа. Метод наименьших квадратов. Остаточная дисперсия. Регрессионные модели технологических процессов. Корреляционное поле. Коэффициент корреляции. Критерий надёжности коэффициента корреляции. Множественная регрессия.

При изучении данного раздела необходимо усвоить, что воспроизводимость физических экспериментов имеет большое значение при исследованиях на обогатимость, а также при теоретическом изучении процессов обогащения. Статистические методы оценки экспериментальных данных дают возможность исследователю оценить достоверность полученных результатов, подтвердить влияние тех или иных факторов на исследуемый результативный признак, определить степень их влияния и форму зависимости.

Литература [5,4,8,9,11].

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Опишите последовательность статистического исследования процесса обогащения полезного ископаемого.

2. Раскройте суть нормального закона распределения (закона Гаусса).

3. Что такое «выборочная дисперсия» и как она определяется?

4. Укажите правила, которые используются при принятии или отбрасывании гипотезы.

5. Опишите методику сравнения двух средних значений при помощи критерия Стьюдента.
6. Раскройте суть последовательного анализа Вальда.
7. Опишите методику парного сравнения дисперсий при помощи критерия Фишера.
8. Раскройте суть однофакторного дисперсионного анализа.
9. В чём заключается задача двухфакторного дисперсионного анализа, особенности его проведения?
10. Для каких целей применяется корреляционный анализ?
11. Опишите последовательность составления уравнения множественной регрессии и оценки её достоверности.

2.7. Статистические методы планирования эксперимента

Традиционный метод планирования экспериментов (метод Зайделя-Гаусса). Ограничивающие условия применения метода статистического планирования. Функция отклика. Требования, предъявляемые к факторам в активном эксперименте. Область определения фактора. Критерий эффективности процесса. Статическая модель процесса. Этапы планирования эксперимента. Выбор критерия эффективности процесса. Определение независимых факторов. Продолжительность переходного процесса. Выбор структуры модели. Методы построения моделей. План эксперимента. Критерии оптимальности планов. Полный факторный эксперимент (ПФЭ). Матрица полного факторного эксперимента. Определение коэффициентов уравнения регрессии. Причины незначимости коэффициента регрессии. Дробный факторный эксперимент (ДФЭ). Определяющий и обобщающий контраст ДФЭ. Правило смешивания коэффициентов. Метод крутого восхождения. Симплексный метод планирования экспериментов. Полиномиальная модель. Ротатабельное центрально-композиционное планирование. Звёздные точки. Нулевые центральные точки. Применение компьютерных технологий обработки данных при исследованиях.

При изучении этого раздела необходимо обратить особое внимание на методику выбора критерия эффективности процесса и определения независимых факторов. Правильный их выбор является залогом успешности планирования и проведения физического эксперимента.

Успешное изучение изложенного материала позволит Вам в дальнейшем самостоятельно выбирать модели процессов, составлять матрицу проведения опытов, оценивать достоверность полученных результатов.

3. КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Контрольное задание по курсу включает 2 задачи. Каждая задача представлена в десяти вариантах. Студент выполняет тот вариант, номер которого соответствует последней цифре учебного шифра.

Ниже приведены примеры выполнения заданий и исходные условия для различных вариантов.

3.1. Задание № 1. Факторный анализ.

Пример. При совместном анализе точности группы измерительных приборов (потенциометров) решается вопрос: можно ли считать их систематические ошибки одинаковыми. Число потенциометров - m ($m = 3$) и каждый из них измеряет pH одной и той же пульпы n раз ($n = 4$). Результаты исследований приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 - Результаты исследований

Номер измерения, n	Число уровней фактора (число потенциометров), m		
	1	2	3
1	13,5	13,0	12,1
2	13,2	12,4	12,2
3	13,1	12,6	13,4
4	13,0	12,0	13,1
Σ	58,2	50,0	50,8
Среднее	13,2	12,5	12,7

Для упрощения вычислений вычитаем из каждого наблюдаемого значения общую среднюю $\bar{x} = (13,2 + 12,5 + 12,7) / 3 = 12,8$ и переходим к уменьшенным величинам, например, $y_{11} = x_{11} - 12,8 = 13,5 - 12,8 = 0,7$ и т.д.

Составляем расчётную таблицу (табл. 3.2) и с использованием итогового столбца вычисляем общую, факторную и остаточную суммы квадратов отклонений при числе уровней фактора $m = 3$ и числе измерений на каждом уровне $n = 4$.

Таблица 3.2 - Расчётная таблица

№ опыта	Уровни фактора						Итоговый столбец
	m_1		m_2		m_3		
	y_{i1}	y_{i1}^2	y_{i2}	y_{i2}^2	y_{i3}	y_{i3}^2	
1	0,7	0,49	0,2	0,04	- 0,7	0,49	
2	0,4	0,16	- 0,4	0,16	- 0,6	0,36	
3	0,3	0,09	- 0,2	0,04	0,6	0,36	
4	0,3	0,04	- 0,8	0,64	0,3	0,09	
Q_j		0,78		0,88		1,30	$\Sigma Q_j = 2,96$
T_j	1,6		- 1,2		- 0,4		$\Sigma T_j = 0$
T_j^2	2,56		1,44		1,69		$\Sigma T_j^2 = 5,69$

Выполняем расчёт следующих параметров:

*Общая сумма квадратов отклонений:

$$S_{\text{общ}} = \sum_{j=1}^m Q_j - \frac{\left[\sum_{j=1}^m T_j \right]^2}{mn} = 2,96 - 0 = 2,96$$

* Факторная сумма квадратов отклонений:

$$S_{\text{факт}} = \frac{\sum_{j=1}^m T_j^2}{n} - \frac{\left[\sum_{j=1}^m T_j \right]^2}{mn} = \frac{5,69}{4} - 0 = 1,42$$

* Остаточная сумма квадратов отклонений:

$$S_{\text{ост}} = S_{\text{общ}} - S_{\text{факт}} = 2,96 - 1,42 = 1,54$$

* Факторная дисперсия:

$$S_{\text{факт}}^2 = \frac{S_{\text{факт}}}{m-1} = \frac{1,42}{3-1} = 0,71$$

* Остаточная дисперсия:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{S_{\text{ост}}}{m(n-1)} = \frac{1,54}{3(4-1)} = 0,17$$

Сравнение факторной и остаточной дисперсии с помощью критерия Фишера:

$$F_{\text{набл}} = S_{\text{факт}}^2 / S_{\text{ост}}^2 = 0,71 / 0,17 = 4,17$$

По таблице значений критерия Фишера при числе степеней свободы числителя $f_1 = 2$, а знаменателя $f_2 = 9$ находим $F_{(0,95; 2; 9)} = 4,26$.

Так как $F_{\text{набл}} < F_{\text{кр}}$, то нет оснований отвергать нулевую гипотезу и, соответственно, различие между групповыми средними незначимо. То есть, все группы наблюдений извлечены из одной генеральной совокупности.

Таблица 3.3. Варианты исходных данных для контрольного задания по факторному анализу

Вариант	Номер измерения, n	Число уровней фактора, m		
		1	2	3
1	2	3	4	5
1	1	10,4	10,7	10,8
	2	11,1	11,0	11,2
	3	10,9	10,5	10,4
	4	10,6	10,4	10,1

Окончание табл. 3.3.

1	2	3	4	5
2	1	12,0	11,8	12,6
	2	12,6	11,4	11,8

	3	12,9	12,0	11,2
	4	11,9	12,3	12,1
3	1	8,4	8,0	8,2
	2	9,6	8,8	7,8
	3	8,5	8,9	8,9
	4	9,1	9,2	9,0
4	1	13,1	12,8	12,7
	2	13,8	13,1	12,4
	3	13,5	13,6	13,2
	4	12,8	13,0	12,6
5	1	9,2	8,2	9,0
	2	9,9	8,8	8,9
	3	8,9	9,4	8,0
	4	8,0	8,9	7,4
6	1	10,2	11,5	11,8
	2	11,2	11,9	11,0
	3	11,1	10,3	10,4
	4	10,5	10,1	10,2
7	1	12,7	12,9	13,4
	2	12,0	13,2	12,9
	3	13,4	12,0	12,2
	4	13,9	11,9	13,6
8	1	8,8	8,9	7,8
	2	8,0	8,5	8,4
	3	7,9	7,9	8,0
	4	7,5	7,0	7,1
9	1	4,7	4,1	4,8
	2	3,2	3,8	3,2
	3	4,4	4,9	3,3
	4	5,0	5,5	4,8
10	1	12,0	11,8	12,8
	2	13,0	12,7	11,5
	3	11,9	13,1	11,7
	4	12,4	12,1	12,1

3.2. Задание № 2. Полный факторный эксперимент

Пример. На обогатительной фабрике были проведены исследования процесса фильтрования магнетитового концентрата. Изучали влияние содержания твёрдого в пульпе ($X_1 = 30 - 60\%$), величины разряжения ($X_2 = 0,03 - 0,09$ МПа) и частоты вращения дисков ($X_3 = 0,2 - 0,5$ мин⁻¹) на удельную производительность вакуум-фильтра (Y , т/ч · м²).

Для планирования эксперимента был использован ПФЭ типа 2^3 , который позволил оценить все линейные эффекты и все их взаимодействия. Матрица планирования и результаты экспериментов приведены в табл. 3.4.

Функцию отклика моделируется полиномом первого порядка с учётом парных взаимодействий факторов:

$$\bar{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3.$$

Коэффициенты уравнения регрессии определяются по формулам:

$$b_0 = N^{-1} \sum_{u=1}^N \bar{y}_u ; \quad b_0 = 1,21 ;$$

$$b_i = N^{-1} \sum_{u=1}^N \bar{y}_u x_{iu} ; \quad b_1 = -0,099 ; \quad b_2 = 0,129 ; \quad b_3 = -0,179 ;$$

$$b_{ij} = N^{-1} \sum_{u=1}^N \bar{y}_u x_{iu} x_{ju} ; \quad b_{12} = -0,019 ; \quad b_{13} = 0,024 ; \quad b_{23} = -0,054 ;$$

$$b_{ijk} = N^{-1} \sum_{u=1}^N \bar{y}_u x_{iu} x_{ju} x_{ku} ; \quad b_{123} = -0,001 .$$

Уравнение регрессии принимает вид:

$$\bar{y} = 1,21 - 0,099 x_1 + 0,129 x_2 - 0,179 x_3 - 0,019 x_1 x_2 - 0,024 x_1 x_3 - 0,054 x_2 x_3 - 0,001 x_1 x_2 x_3.$$

Проводится проверка гипотезы об однородности выборочных дисперсий воспроизводимости.

Критерий Кохрена $G_{табл.}$ со степенями свободы: $f_1 = m - 1 = 6 - 1 = 5$, $f_2 = N = 8$ и степенью риска $\alpha = 0,05$: $G_{табл.} = 0,4387$

при
$$G = \frac{S_{y \max}^2}{\sum_1^n S_y^2} = 0,326 < G_{табл.}$$

гипотеза об однородности не отвергается.

Рассчитывается оценка дисперсии воспроизводимости со степенью свободы $f = f_1 \cdot f_2 = 5 \cdot 8 = 40$:

$$S^2 = \left[\sum_1^n S_y^2 \right] / N = 57 \cdot 10^{-3} / 8 = 7,125 \cdot 10^{-3}$$

Таблица 3.4 - Матрица планирования и результаты эксперимента

Интервал варьирования. № опыта	Уровни факторов			Взаимодействия факторов				Опытные данные		Расчёт ȳ
	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	ȳ	$S_y^2 \cdot 10^3$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Основной уровень $x_i = 0$	45	0,06	0,4							
Интервал варьирования Δx	15	0,03	0,2							
Верхний уровень $x_i = + 1$	60	0,09	0,6							
Нижний уровень $x_i = - 1$	30	0,03	0,2							
№ опыта:										
1	+	+	+	+	+	+	+	1,01	2,2	1,01
2	-	+	+	-	-	+	-	1,20	5,5	1,21
3	+	-	+	-	+	-	-	0,90	7,4	0,85
4	-	-	+	+	-	-	+	1,01	9,1	1,05
5	+	+	-	+	-	-	-	1,43	18,6	1,47
6	-	+	-	-	+	-	+	1,71	3,2	1,67
7	+	-	-	-	-	+	+	1,10	0,9	1,11
8	-	-	-	+	+	+	-	1,31	10,1	1,30

Примечание. В столбце 9 приведены средние значения функции отклика \bar{y} (удельная производительность вакуум-фильтра, т/ч · м²); в столбце 10 - дисперсия воспроизводимости опытных данных в каждой серии опытов ($m = 6$); в столбце 11 - результаты расчёта удельной производительности фильтра по полученным уравнениям.

Значимость коэффициентов регрессии проверяют с помощью критерия Стьюдента. Коэффициент значим, если $|b_i| \geq tS_{b_i}$.

$$S_{b_i} = \sqrt{S^2 / Nm} = \sqrt{7,125 / 8 \cdot 6} = 0,0121.$$

При $\alpha = 0,05$ и $f = N(m-1) = 40$ $t = 2,0211$.

$$b_{кр} = tS_{b_i} = 2,0211 \cdot 0,0121 = 0,0244.$$

Таким образом, коэффициенты b_{12} , b_{13} и b_{123} принимаются незначимыми и уравнение регрессии принимает вид:

$$\bar{y} = 1,21 - 0,099x_1 - 0,129x_2 - 0,179x_3 - 0,054x_2x_3.$$

Проверка адекватности модели:

$$S_{ад}^2 = m^{-1} \sum_{u=1}^N [y_u - \bar{y}_u]^2 = [6 \cdot 8 - 5]^{-1} \cdot 100,8 \cdot 10^{-3} = 5,6 \cdot 10^{-3}.$$

Адекватность проверяется по критерию Фишера. При уровне значимости $1 - \alpha = 95\%$ и степенях свободы $f_1 = N - d = 3$ и $f_2 = N \cdot m - 1 = 40$ критерий Фишера $F_{кр} = 2,84$.

$$\text{Отношение } F = S_{ад}^2 / S^2 = 5,6 \cdot 10^{-3} / 7,125 \cdot 10^{-3} = 0,79 < F_{кр}.$$

Модель признается адекватной.

Таблица 3.5. Варианты исходных данных для контрольного задания по полному факторному эксперименту

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чертов, А.Г. Физические величины / А.Г. Чертов. – М.: Высшая школа, 1990. – 335 с.
2. Кучин, Б.Л. Технологические измерения и измерительные приборы / Б.Л. Кучин. – М.: Металлургия, 1971. – 94 с.
3. Смирнов, В.О. Моделювання процесів збагачення корисних копалин / В.О. Смирнов, П.В. Сергеев, В.С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2011. – 300 с.
4. Папушин, Ю.Л. Дослідження корисних копалин на збагачуваність / Ю.Л. Папушин, В.О.Смирнов, В.С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2006. – 344 с.
5. Рубинштейн, Ю.Б. Математические методы в обогащении полезных ископаемых / Ю.Б. Рубинштейн, Л.А. Волков. – М.: Недра, 1987. – 296 с.
6. Прохоров, С.А. Математическое описание и моделирование специальных процессов / С.А. Прохоров. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2001. – 209 с.
7. Клайн, С.Д. Подобие и приближенные методы / С.Д. Клайн. – М.: Мир, 1968. – 304 с.

8. Козин, В.З. Экспериментальное моделирование и оптимизация процессов обогащения полезных ископаемых / В.З. Козин. – М.: Недра, 1984.–112 с.

9. Технологическая оценка минерального сырья. Методы исследования: справочник / под ред. П.Е. Остапенко. – М.: Недра, 1990. – 264 с.

10. Теория и техника физического эксперимента при обогащении полезных ископаемых: учеб. пособие для вузов / В.Г. Самойлик, А.Н. Корчевский.– Донецк: ООО «Східний видавничий дім», 2016.–205 с.

11. Тихонов, О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых / О.Н. Тихонов. – М.: Недра, 1984. – 208 с.

12. Губин, В.И. Статистические методы обработки экспериментальных данных: учеб. пособие / В.И. Губин, В.Н. Осташков. – Тюмень: Изд-во «ТюмГНГУ», 2007. – 202 с.

13. Пилов, П.И. Математическое моделирование и структурно-экстраполярный анализ в задачах обогащения: монография /П.И. Пилов, А.М. Мильцын, В.И. Олевский. – 2-е изд., испр. и доп. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2011. – 187 с.