

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Энгельский технологический институт (филиал)
Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.

Соловьева Н.Д., Фролов И.А., Фролова И.И.

**ПРИМЕНЕНИЕ ОРТОГОНАЛЬНОГО ЦЕНТРАЛЬНОГО
КОМПОЗИЦИОННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ
РЕШЕНИИ ВОПРОСОВ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению учебно-исследовательских лабораторных работ по дисциплинам «Моделирование и оптимизация процессов в технологии переработки полимеров и композитов», «Моделирование и оптимизация процессов в электрохимической технологии» для магистрантов очной и заочной форм обучения направления 18.04.01 «Химическая технология» всех программ

Энгельс 2026

УДК 66:51-7

**ББК
С 60**

С 60 Применение ортогонального центрального композиционного планирования эксперимента при решении вопросов оптимизации технологического процесса: методические указания

Руководство к выполнению учебно-исследовательских лабораторных работ по дисциплинам «Моделирование и оптимизация процессов в технологии переработки полимеров и композитов», «Моделирование и оптимизация процессов в электрохимической технологии» для магистрантов очной и заочной форм обучения направления 18.04.01 «Химическая технология» всех программ - Энгельс: Изд-во ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., кафедр «Химические технологии», 2026. - 23 с.

Методические рекомендации предназначены для преподавателей и студентов ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» Энгельсский технологический институт (филиал) очной и заочной форм обучения направления 18.04.01 Химическая технология всех программ.

Методические рекомендации подготовлены с учетом требований Федерального государственного образовательного стандарта. Могут быть полезны преподавателям и студентам других высших и средних учебных заведений и направлений широкого профиля.

**УДК 66:51-7
ББК**

*Одобрено редакционно-издательским советом
ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А.*

Брошюра издается в авторской редакции

Содержание

Введение	3
1.2. Интерфейс пользователя	13
2. Пример использования ОЦКП	15
3. Экспериментальная часть	20
4. Вопросы для самопроверки	20
Список литературы	21
Приложение 1 Значение критерия Кохрена	22
Приложение 2 Значения критерия Стьюдента	22
Приложение 3 Значение критерия Фишера	23

При разработке экспериментально-статистических моделей химико-технологических процессов (ХТС), элементов ХТС изучается влияние различных факторов на выходную технологическую характеристику. При этом математическое описание элемента строится в виде регрессионных зависимостей выходных параметров объекта (y) от входных переменных (факторов) (x) и представляет собой линейные или полиномиальные уравнения. Коэффициенты уравнения регрессии находятся путем реализации методов планирования эксперимента.

Математические модели, получаемые с помощью методов планирования эксперимента, называются экспериментально-статистическими.

Математическое описание технологического процесса

- дает качественную и количественную информацию о влиянии каждого фактора процесса;
- позволяет рассчитать значение функции отклика (параметра) при заданном режиме ведения технологического процесса;
- может служить основой для оптимизации технологического процесса.

Оптимизацией процесса называют целенаправленный поиск наилучших условий его проведения. Проводить оптимизацию можно используя различные методы: метод крутого восхождения, симплекс метод, ортогональное центральное композиционное планирование (ОЦКП) и др.

1. Построение моделей на основе данных активного эксперимента методом ОЦКП

Тогда, когда зависимости между выходными и входными параметрами элемента ХТС носят явно нелинейный характер, для получения коэффициентов матрицы преобразования не могут быть использованы планы первого порядка. Для получения математического описания объекта в этом случае часто используют так называемые композиционные планы второго порядка, например, ортогональный центральный композиционный план (ОЦКП). Описание элемента ХТС получают в виде полиномиального уравнения второго порядка:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 \quad (1.1.)$$

Для нахождения коэффициентов этого полинома необходим эксперимент, в котором каждый фактор (x_i) варьировался бы не менее чем на трех уровнях.

Структура плана второго порядка, предназначенного для нахождения коэффициентов квадратичной модели (1.1), имеет существенное значение. Дело в том, что исследователь обращается к планам второго порядка обычно после того, как ему не удалось получить адекватной модели в результате реализации полного факторного эксперимента (ПФЭ) или дробного факторного эксперимента (ДФЭ), т.е. плана первого порядка. При этом, естественно, возникает желание сохранить и в дальнейшем использовать результаты эксперимента, выполненного на предыдущем этапе исследований.

С учетом этих соображений разработаны композиционные планы второго порядка. Структура этих планов представляет собой композицию из плана первого порядка и некоторого числа добавочных опытов. При этом один или несколько опытов проводятся в центре плана. Благодаря своей структуре, такие планы экспериментов называются центральными композиционными (ЦКП).

Таблица 1.1.

Матрица двухфакторного композиционного плана второго порядка.

Номер опыта	Фрагмент плана	x_1	x_2	$x_1 x_2$	y	Номер опыта	Фрагмент плана	x_1	x_2	$x_1 x_2$	y
1	Ядро	+1	+1	+1	y_1	5	Звездные точки	$+\infty$	0	0	y_5
2		-1	+1	-1	y_2	6		$-\infty$	0	0	y_6
3		+1	-1	-1	y_3	7		0	$+\infty$	0	y_7
4		-1	-1	+1	y_4	8		0	$-\infty$	0	y_8
						9	Центр	0	0	0	y_9

Таблица 1.2.

Матрица трехфакторного композиционного плана второго порядка.

Номер опыта	Фрагмент плана	x_1	x_2	x_3	y	Номер опыта	Фрагмент плана	x_1	x_2	x_3	y
1	Ядро	+1	+1	+1	y_1	9	Звездные точки	$+\infty$	0	0	y_9
2		-1	+1	+1	y_2	10		$-\infty$	0	0	y_{10}
3		+1	-1	+1	y_3	11		0	$+\infty$	0	y_{11}
4		-1	-1	+1	y_4	12		0	$-\infty$	0	y_{12}
5		+1	+1	-1	y_5	13		0	0	$+\infty$	y_{13}
6		-1	+1	-1	y_6	14		0	0	$-\infty$	y_{14}
7		+1	-1	-1	y_7	15	Центр	0	0	0	y_{15}
8	-1	-1	-1	y_8							

Если число факторов больше четырех, то в качестве ядра плана целесообразно использовать ДФЭ. Общее число опытов ЦКП рассчитывают по формуле:

$$N_{\text{ЦКП}} = N_{\text{я}} + N_{\text{зв}} + N_0, \quad (1.2.)$$

где $N_{\text{я}}$ – число опытов в ядре плана, $N_{\text{зв}}$ – число опытов в звездных точках, N_0 – число центральных опытов.

Очевидно, что $N_{зв} = 2n$, т.е. вдвое превышает число факторов (n – число факторов).

Из структуры ЦКП следует, что каждый фактор варьируется на пяти уровнях: $-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$.

Таким образом, если с помощью ПФЭ или ДФЭ невозможно получить адекватного математического описания поверхности отклика, необходимо перейти к ЦКП второго порядка, добавив опыты в звездных точках и в центре плана.

Название этого вида планирования обусловлено свойством ортогональности его матрицы. Это свойство записывается следующим образом:

$$\sum_{j=1}^N x_{jl}x_{jm} = 0, l \neq m, l, m = 1, 2, \dots, n \quad (1.3.)$$

Иными словами, сумма парных произведений элементов двух любых столбцов матрицы планирования равна нулю. На основании указанного свойства оценки коэффициентов регрессии рассчитываются независимо друг от друга и имеется возможность исключить из рассмотрения те факторы, при которых коэффициенты оказываются незначимыми.

Следует однако отметить, что свойство ортогональности не выполняется для столбцов, содержащих квадраты значений факторов, т.е.:

$$\sum_{j=1}^N x_{jl}^2 x_{jm}^2 \neq 0 \quad (1.4.)$$

Для обеспечения ортогональности всех столбцов матрицы планирования вместо квадратов значений факторов вводят новые переменные:

$$x_{ji}^* = x_{ji}^2 - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{jl}^2; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (1.5.)$$

Из условия ортогональности $\sum_{j=1}^N x_{jl}^* x_{jm}^* = 0$ получено уравнение для звездного плеча α :

$$4\alpha^4 + 4\alpha^2 N_{\text{я}} - N_{\text{я}} (N_{\text{зв}} + N_0) = 0 \quad (1.6.)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$\alpha = \sqrt{\sqrt{N_{\text{я}}^2 + N_{\text{я}}(N_{\text{зв}} + 1) - N_{\text{я}}/2}} \quad (1.7)$$

Таблица 1.3.

Основные характеристики ОЦКП

n	$N_{\text{я}}$	$N_{\text{зв}}$	N_0	N	α
2	2^2	4	1	9	1,000
3	2^2	6	1	15	1,215
4	2^4	8	1	25	1,414
5	2^{5-1}	10	1	27	1,547

В ОЦКП второго порядка не накладывается никаких ограничений на число опытов в центре плана N_0 . Обычно принимают $N_0 = 1$.

Таблица 1.4.

Матрица ОЦКП для двух факторов

Номер опыта	Фрагмент плана	x_1	x_2	$x_1 x_2$	$x_1^* = x_1^2 - 2/3$	$x_2^* = x_2^2 - 2/3$	y
1	Ядро	+1	+1	+1	+0,33	+0,33	y_1
2		-1	+1	-1	+0,33	+0,33	y_2
3		+1	-1	-1	+0,33	+0,33	y_3
4		-1	-1	+1	+0,33	+0,33	y_4
5	Звездные точки	+1	0	0	+0,33	-0,67	y_5
6		-1	0	0	+0,33	-0,67	y_6
7		0	+1	0	-0,67	+0,33	y_7

8		0	-1	0	-0,67	+0,33	y_8
9	Центр	0	0	0	-0,67	-0,67	y_9

В табл. 1.3. приведены основные характеристики ОЦКП, в табл. 1.4. представлена матрица ОЦКП для двух факторов. При ее построении использованы вспомогательные переменные x_1^* и x_2^* :

$$x_1^* = x_1^2 - \frac{1}{9} \sum_{j=1}^9 x_{j1}^2 = x_1^2 - \frac{2}{3}$$

(1.8)

$$x_2^* = x_2^2 - \frac{1}{9} \sum_{j=1}^9 x_{j2}^2 = x_2^2 - \frac{2}{3}$$

(1.9)

С помощью ОЦКП ищут коэффициенты уравнения регрессии следующего вида:

$$y = b_0^* + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i<1} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} \left(x_i^2 - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ji}^2 \right)$$

(1.10.)

или

$$y = b_0^* + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i<1} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^*$$

(1.11.)

В силу ортогональности матрицы ОЦКП все коэффициенты регрессии определяются независимо друг от друга

$$b_0^* = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j$$

(1.12.)

$$b_i = \sum_{j=1}^N x_{ji} y_j / \sum_{j=1}^N x_{ji}^2$$

(1.13.)

$$b_{lm} = \sum_{j=1}^N x_{jl} x_{jm} y_j / (x_{jl} x_{jm})^2; l \neq m$$

(1.14.)

$$b_{ii} = \sum_{j=1}^N X_{ji}^* y_j / \sum_{j=1}^N (x_{ji}^*)^2 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

(1.15.)

Например, применяя формулу (1.13.) к данным таблицы 1.4. получим:

$$b_1 = 1/6 (y_1 - y_2 + y_3 - y_4 + y_5 - y_6)$$

(1.16.)

$$b_{11} = \frac{\frac{1}{3}(y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6)}{2} - \frac{\frac{2}{3}(y_7 + y_8 + y_9)}{2}$$

(1.17.)

Для перехода от уравнения регрессии вида (1.11.) к обычной форме записи (1.1.) находят коэффициент:

$$b_0 = b_0^* - \frac{b_{11}}{N} \sum_{j=1}^N x_{j1}^2 - \dots - \frac{b_{nn}}{N} \sum_{j=1}^N x_{jn}^2$$

(1.18.)

Заметим при этом, что:

$$\sum_{j=1}^N x_{j1}^2 = \dots = \sum_{j=1}^N x_{jn}^2$$

(1.19.)

Поэтому:

$$b_0 = b_0^* - \frac{1}{N} (\sum_{j=1}^N x_{ji}^2) (\sum_{i=1}^n b_{ii})$$

(1.20.)

Например, для данных таблицы 1.4. имеем:

$$b_0 = b_0^* - \frac{1}{N} 6(b_{11} + b_{22}) = b_0^* - \frac{2}{3} 6(b_{11} + b_{22})$$

(1.21.)

При проведении ОЦКП опыты либо не дублируются, т.е. каждый опыт проводится однократно, либо дублируются одинаковое число раз. Дисперсию воспроизводимости оценивают по обычным правилам.

При одинаковом числе повторных опытов находят построчные средние значения функции отклика y_j и соответствующие оценки дисперсий S_j^2 .

если S_j^2 однородны, то оценку дисперсии воспроизводимости рассчитывают по формуле:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2$$

(1.22.)

Для расчета оценок дисперсий в определении коэффициентов регрессии пользуются следующими формулами:

$$S_{b_0}^2 = \frac{S_y^2}{kN}$$

(1.23.)

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{k \sum_{j=1}^N x_{ji}^2}$$

(1.24.)

$$S_{b_{lm}}^2 = \frac{S_y^2}{k \sum_{j=1}^N (x_{ji} x_{jm})^2} \quad l \neq m$$

(1.25.)

$$S_{b_{ii}}^2 = \frac{S_y^2}{k \sum_{j=1}^N (x_{ji}^*)^2}$$

(1.26.)

$$S_{b_0}^2 = S_{b_0^*}^2 + \frac{n S_{b_{ii}}^2}{N} \sum_{j=1}^N x_{ji}^2$$

(1.27.)

Здесь k – число параллельных опытов, проводимых при одинаковых условиях. Если опыты не дублируются, то $k = 1$

Гипотезу о значимости коэффициентов регрессии проверяют с помощью критерия Стьюдента. Любой коэффициент регрессии b_i считается значимым, если выполняется условие

$$|b_i| > S_{b_i} t_{\text{таб}}$$

(1.28.)

где $S_{b_i}^0$ – оценка дисперсии, с которой определяется коэффициент дисперсии; S_{b_i} – среднеквадратичная ошибка; $t_{\text{таб}}$ – табличное значение коэффициента Стьюдента.

В случае невыполнения условия (1.28.) коэффициент регрессии считается незначимым и приравнивается к нулю. Однако незначимость его может быть вызвана также неверным выбором интервала варьирования по соответствующему фактору, поэтому в ряде случаев целесообразно расширить интервал варьирования по соответствующему фактору и провести новые исследования.

Проверка адекватности полученного уравнения регрессии экспериментальным данным проводится с помощью критерия Фишера

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_y^2}$$

(1.29.)

где $S_{\text{ад}}^2$ – оценка дисперсии адекватности.

Дисперсию адекватности оценивают по формуле:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{1}{N-B} \sum_{j=1}^N (y_j^{\text{э}} - y_j^{\text{р}})^2$$

(1.30.)

где B – число значимых коэффициентов уравнения регрессии; $y_j^{\text{э}}$, $y_j^{\text{р}}$ – экспериментальное и расчетное значение функции отклика в j -м опыте.

С оценкой дисперсии адекватности связано число степеней свободы:

$$f_{\text{ад}} = N - B$$

(1.31.)

Считается, что уравнение регрессии адекватно описывает экспериментальные данные, если выполняется условие

$$F_p \leq F_{\text{таб}}$$

(1.32.)

где $F_{\text{таб}}$ – табличное значение критерия Фишера.

Для определения табличного значения критерия Фишера необходимо знать числа степеней свободы, связанные с числителем и знаменателем выражения (1.33.)

1.2. Интерфейс пользователя

Для пользователя приложение предоставляет следующие возможности:

- выбор количества факторов;
- возможность дублирования опытов;
- изучение оценки коэффициентов на значимость;
- сохранение полученных результатов.

Интерфейс приложения поделен на несколько полей. Главное поле приложения имеет следующий вид (рис. 1.1):

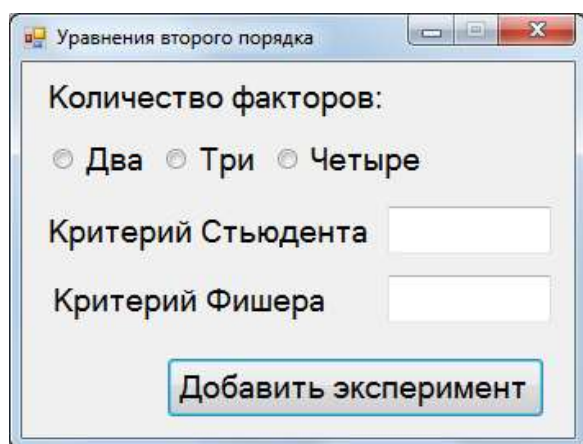


Рис. 1.1 Главное поле приложения

С помощью Radiobutton пользователь выбирает количество факторов при построении полиномиального уравнения второго порядка («Два», «Три», «Четыре»). Далее пользователь вводит табличные значения критериев Стьюдента и Фишера в поля «Критерий Стьюдента» и «Критерий Фишера». С помощью кнопки «Добавить эксперимент» появляется возможность ввода результатов эксперимента в зависимости от выбора количества факторов.

Также в главном поле выводятся поля с отчетом об ошибке, информирующие пользователя об отсутствии выбора количества факторов, об оставлении пустыми поля «Критерий Стьюдента» и «Критерий Фишера», запрещающие нажатие кнопки «Добавить эксперимент» (рис. 1.2). Существует триггер, запрещающий ввод любых символов, кроме цифр, точки и запятой.

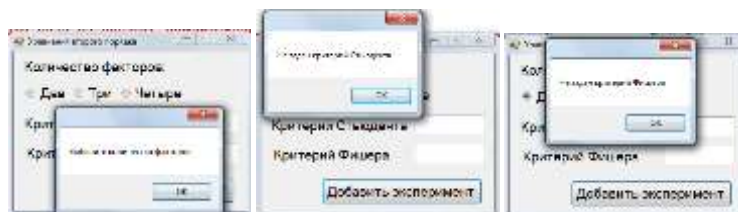


Рис. 1.2 Поля с отчетом об ошибке

После нажатия пользователем кнопки «Добавить эксперимент» появляется поле «Эксперимент» (рис. 1.3). При повторном нажатии появляется возможность ввода результатов параллельного опыта. В зависимости от выбора количества факторов активно разное число полей (для двух факторов – девять полей, для трех факторов – пятнадцать полей, для четырех факторов – 25 полей).

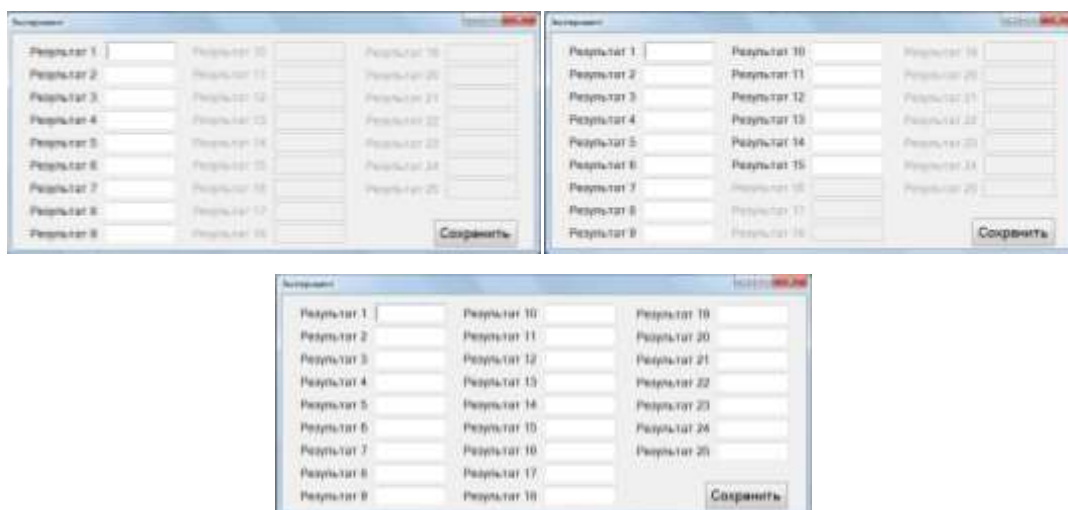


Рис. 1.3 Поля «Эксперимент» в зависимости от выбора количества факторов

В поле эксперимент также выводится поле с отчетом об ошибке (рис. 1.4), и существует триггер, запрещающий ввод любых символов, кроме цифр, точки и запятой.



Рис. 1.4 Поле с отчетом об ошибке

После нажатия кнопки «Сохранить» во все открытых полях «Эксперимент», приложение произведет расчет и выведет результаты на экран (рис. 1.5)

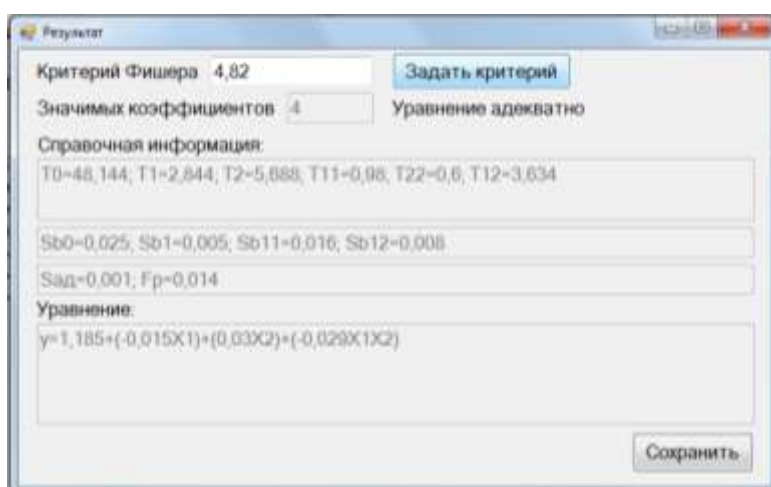


Рис. 1.5 Вывод результатов на экран

В окне «Результат» необходимо ввести критерий Фишера, после нажатия кнопки «Задать критерий», появится надпись об адекватности уравнения. Ниже представлена справочная информация, которая может быть полезна пользователю. В поле «Уравнение» выводится полученное уравнение. С помощью кнопки «Сохранить» пользователь может сохранить справочную информацию. Эта информация записывается в файле info.txt в директории приложения.

2. Пример использования ОЦКП

Производилось построение математической модели электрохимического процесса никелирования. Данный эксперимент является двухфакторным: фактор 1 – толщина покрытия, фактор 2 – соотношение

импульс : пауза в импульсном режиме электролиза. Исследовалось влияние выбранных факторов на защитную способность никелевого покрытия – у, которая оценивалась по ширине области пассивного состояния на потенциодинамических кривых, снятых в 3% растворе NaCl в анодную и катодную стороны от потенциала погружения электрода со скоростью развертки потенциала 4мВ/с. Для получения полиномиального уравнения использовалось ортогональное центральное композиционное планирование.

Результаты эксперимента (две серии опытов) представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты эксперимента

	Эксперимент №1	Эксперимент №2	\bar{y}
y_1	1,05	1,33	1,19
y_2	1,18	1,4	1,29
y_3	1,02	1,35	1,185
y_4	1	1,34	1,17
y_5	0,96	1,4	1,18
y_6	0,97	1,4	1,185
y_7	0,97	1,4	1,185
y_8	0,96	1,3	1,13
y_9	1,02	1,35	1,185

По формулам (1.12-1.21) рассчитываются коэффициенты уравнения, регрессии:

$$b_0^* = \frac{1}{9}(y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8 + y_9) = 1,189;$$

$$b_1 = \frac{1}{6}(y_1 - y_2 + y_3 - y_4 + y_5 - y_6) = -0,015;$$

$$b_2 = \frac{1}{6}(y_1 + y_2 - y_3 - y_4 + y_7 - y_8) = 0,03;$$

$$b_{11} = \frac{1}{6}(y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6) - \frac{1}{3}(y_7 + y_8 + y_9) = 0,0155;$$

$$b_{22} = \frac{1}{6}(y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_7 + y_8) - \frac{1}{3}(y_5 + y_6 + y_9) = 0,009;$$

$$b_{12} = \frac{1}{4}(y_1 - y_2 - y_3 + y_4) = -0,029;$$

$$b_0 = b_0^* - \frac{2}{3}(b_{11} + b_{22}) = 1,184.$$

Построчно находятся оценки дисперсий по формуле:

$$S_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^n (y_{ji} - \bar{y}_i)$$

$$S_1^2 = 0,00392; S_2^2 = 0,00242; S_3^2 = 0,00545;$$

$$S_4^2 = 0,0578; S_5^2 = 0,00968; S_6^2 = 0,00925;$$

$$S_7^2 = 0,00925; S_8^2 = 0,00578; S_9^2 = 0,00545.$$

По формуле (1.22) определяется дисперсия воспроизводимости:

$$S_y^2 = \frac{1}{9}(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2 + S_5^2 + S_6^2 + S_7^2 + S_8^2 + S_9^2) = 0,0633.$$

По формулам (1.23-1.27) рассчитываются оценки дисперсии в определении коэффициентов:

$$S_{b_0^*}^2 = 0,003517; S_{b_1}^2 = 0,005275; S_{b_2}^2 = 0,005275;$$

$$S_{b_{11}}^2 = 0,015825; S_{b_{22}}^2 = 0,015825; S_{b_{12}}^2 = 0,0079125;$$

$$S_{b_0}^2 = 0,024617.$$

Полученные коэффициенты оцениваются на значимость ($t_{\text{таб}} = 2,26$):

$$t_0 = 48,14 > t_{\text{таб}};$$

$$t_1 = 2,843 > t_{\text{таб}};$$

$$t_2 = 5,68 > t_{\text{таб}};$$

$$t_{11} = 0,98 < t_{\text{таб}};$$

$$t_{22} = 0,66 < t_{\text{таб}};$$

$$t_{12} = 3,66 > t_{\text{таб}}.$$

Окончательно уравнение регрессии записывается после отбрасывания незначимых коэффициентов:

$$y = 1,184 - 0,015x_1 + 0,03x_2 - 0,029x_{12}$$

Рассчитывается дисперсия адекватности и уравнение проверяется на адекватность с помощью критерия Фишера (2.29-2.30) ($F_T = 4,82$):

$$S_{\text{ад}}^2 = 0,001548;$$

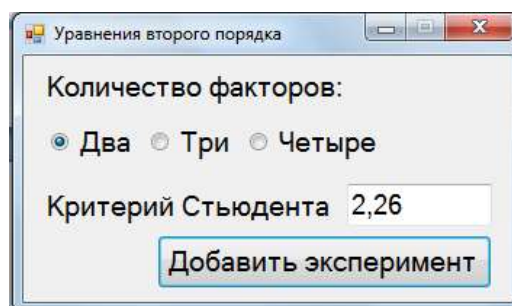
$$F_p = 0,014646.$$

$$F_p < F_T,$$

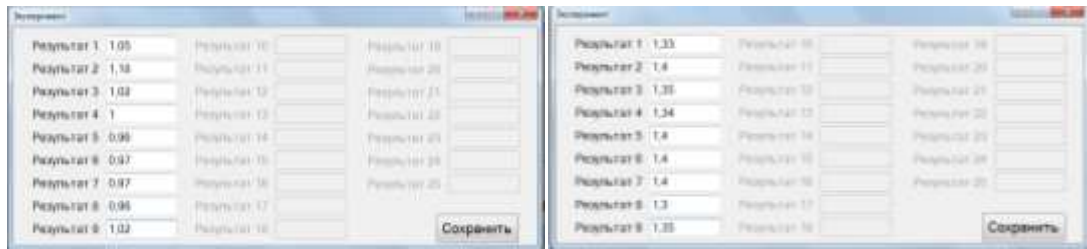
Значит уравнение адекватно.

Произведем те же самые расчеты с помощью приложения:

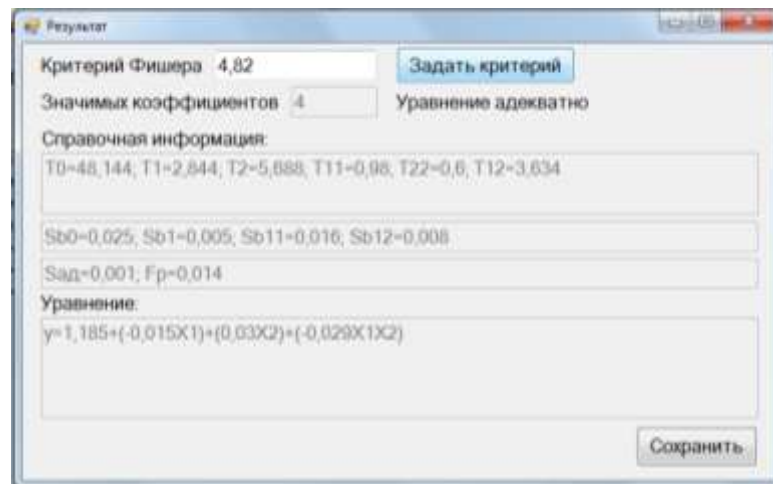
1. Выберем количество факторов и введем критерий Стьюдента



2. Введем результаты параллельных опытов



3. Получим полиномиальное уравнение, изучим справочную информацию



3. Экспериментальная часть

3.1. Задание на проведение моделирования выдается преподавателем. Оно включает:

- а) вид покрытия, свойства которого изучаются (Ni, Zn, сплав (Zn-Ni), КЭП (Zn-УНТ));
 - б) параметр оптимизации (выходной параметр) (y), выход по току, защитная способность);
 - с) факторы, влияющие на величину параметра оптимизации (y) (плотность тока поляризации, состав электролита, температура, pH)
- Рекомендуется использовать не более 3-х факторов.

3.2. После обоснования выбора факторов (x), выходного параметра (y) и составления таблицы 1.1 или 1.2 приступают к электроосаждению покрытий, используя методические указания к лабораторным работам авторов Г.В. Целуйкиной, С.М. Закировой «Прикладная электрохимия» [5]. Проводится не менее 2-х параллельных опытов.

3.3. Электроосажденные покрытия анализируются: определяется выход по току и защитная способность в соответствии с методическими указаниями «Дофазовое осаждение металла и его влияние на скорость и свойства электроосаждаемого покрытия» авторов Н.Д. Соловьевой, Т.Ю. Шевченко [6]. Используя полученные экспериментальные данные, заполняют таблицу 1.1 или 1.2 (в зависимости от числа факторов x).

3.4. Производится расчет коэффициентов уравнения регрессии (уравнение 1.12-1.21), оценка их значимости (уравнение 1.23-1.28) , оценка адекватности полученного уравнения (уравнение 1.29-1.32).

3.5. Записывается уравнение регрессии и проводится его анализ.

3.6. Вывод из проделанной работы.

4. Вопросы для самопроверки

1. Метод математического моделирования, применение.
2. Понятие объекта моделирования, модели.
3. Виды моделей.
4. Этапы построения детермированной модели.
5. Понятие числа степеней свободы. Физический и математический смысл.
6. Оценка адекватности модели. Критерий Фишера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабенкова Т.В. Математическая обработка результатов эксперимента: учеб. пособие / Т.В. Бабенкова, Д.А. Бредихин, В.Н. Филатов. – Саратов: СГТУ, 2010. - 112с.
2. Клинаев Ю.В. Методы и технологии компьютерных вычислений в математическом моделировании: учеб. пособие / Клинаев, Д.В. Терин – Саратов: СГТУ, 2010.-208с
3. Саутин С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. / С.Н. Саутин. - Л.: Химия, 1975. – 48 с.
4. Закгейм А.Ю. Общая химическая технология: Введение в моделирование химико-технологических процессов./ А.Ю. Закгейм. - М.: Логос, 2009. – 304 с.
5. Прикладная электрохимия: метод. указания к лабораторным работам / Г.В. Целуйкина, С.М. Закирова. – Энгельс: Изд-во ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2015. - 54 с.
6. Дофазовое осаждение металла и его влияние на скорость и свойства электроосаждаемого покрытия: метод. указания к учебно-исследовательским работам / Н.Д. Соловьева, Т.Ю. Шевченко. – Энгельс: Изд-во ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2015. - 16 с.

Приложение 1

Значение критерия Кохрена

N	f=k-1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
2	0,999	0,975	0,939	0,906	0,877	0,853	0,833	0,816
3	0,967	0,781	0,798	0,746	0,707	0,677	0,653	0,633
4	0,907	0,768	0,684	0,629	0,590	0,560	0,637	0,518
5	0,841	0,684	0,598	0,544	0,507	0,478	0,456	0,439
6	0,781	0,616	0,532	0,480	0,445	0,418	0,398	0,382
7	0,727	0,561	0,480	0,431	0,397	0,373	0,354	0,338
8	0,680	0,516	0,438	0,391	0,360	0,336	0,319	0,304
9	0,639	0,478	0,403	0,358	0,329	0,307	0,290	0,277
10	0,602	0,445	0,373	0,331	0,303	0,282	0,267	0,254

Приложение 2

Значения критерия Стьюдента

Число степеней свободы - f	Значение критерия Стьюдента - t	Число степеней свободы - f	Значение критерия Стьюдента - t	Число степеней свободы - f	Значение критерия Стьюдента - t
1	12,71	5	2,57	9	2,26
2	4,30	6	2,45	10	2,23
3	3,18	7	2,36		
4	2,78	8	2,31		

Значение критерия Фишера

Число степеней свободы f_2	Число степеней свободы f_1 (для числителя)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	161,45	199,50	215,71	224,58	230,16	23,99	236,77	238,88
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82
6	5,99	5,14	4,73	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,24
10	4,97	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,10	3,01	2,95
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59
17	4,45	3,59	3,20	2,97	2,81	2,70	2,71	2,55
18	4,41	3,56	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45

Соловьева Нина Дмитриевна
Фролов Иван Александрович
Фролова Ирина Ильинична

**ПРИМЕНЕНИЕ ОРТОГОНАЛЬНОГО ЦЕНТРАЛЬНОГО
КОМПОЗИЦИОННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ
РЕШЕНИИ ВОПРОСОВ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ