

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Тюменский индустриальный университет  
Кафедра «Товароведения и технологии продуктов питания»

**МОДЕЛИРОВАНИЕ  
БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ**

Методические рекомендации по выполнению курсового проекта  
по направлению 19.04.01 Биотехнология  
очной формы обучения

Тюмень  
2024

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры «Товароведения и технологии продуктов питания» протокол №2/1 от 24.09.2024

Составитель:

Доктор технических наук Попов В.Г.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ .....	5
2 ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕКСТА ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ .....	12
2.1 Общие требования .....	12
2.2 Построение текста.....	12
2.3 Размер полей текста .....	13
2.4 Изложение текста .....	14
2.5 Оформление ссылок.....	14
2.6 Иллюстрации .....	15
2.7 Оформление таблиц .....	16
3 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ.....	17
3.1 Пример выполнения расчетной части курсовой работы .....	17
ЛИТЕРАТУРА .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное). Форма задания на курсовую работу.....	32
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное). Форма титульного листа пояснительной записки к курсовой работе .....	34
ПРИЛОЖЕНИЕ В (рекомендуемое). Пример оформления содержания пояснительной записки к курсовой работе .....	35
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное). Пример оформления библиографических ссылок в списке использованных источников .....	36
ПРИЛОЖЕНИЕ Д (обязательное). Справочные данные .....	39
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж (обязательное). Варианты заданий.....	40

## ВВЕДЕНИЕ

Описание поведения и прогнозирование состояния сложных технических объектов затруднено отсутствием достаточного количества математических моделей. В ряде случаев простым выходом из ситуации является использование регрессионных закономерностей, получаемых в ходе планирования эксперимента. К сожалению, регрессионные закономерности не дают представлений о типе протекающих в системе процессов и не могут быть использованы вне области планирования эксперимента. При этом их достоинством является способность описания любого объекта при полном соблюдении алгоритма активного эксперимента.

Полный факторный эксперимент является наиболее легко реализуемым среди многочисленных методов активного эксперимента. При использовании полного факторного эксперимента цель исследователя как получить линейную математическую модель процесса, так и определиться с дальнейшей стратегией проведения эксперимента.

В настоящих методических указаниях к выполнению курсовой работы по дисциплине «Моделирование биотехнологических процессов» рассматриваются вопросы практического применения приемов математического моделирования с использованием методики полного факторного эксперимента, включая следующие этапы:

- проверка воспроизводимости результатов эксперимента;
- построение математической модели в явном виде с расчетом коэффициентов уравнения регрессии;
- проверка адекватности математической модели;
- инженерная интерпретация полученного уравнения регрессии, позволяющая оценить зависимость параметра оптимизации от выбранных факторов и сформулировать условия для повышения эффективности изучаемого биотехнологического процесса.

## 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для получения математической модели процесса. При этом важно учитывать следующее: стремление к минимизации числа опытов; одновременное варьирование всех переменных, определяющих процесс; выбор четкой стратегии, позволяющей принимать обоснованные решения после каждой серии экспериментов. Перед проведением планирования активного

эксперимента необходимо собрать дополнительную информацию об исследуемом объекте, для получения которой используются навыки и знания, которые получены ранее в предыдущих исследованиях или описаны в литературе. При использовании метода активного планирования весь эксперимент обычно разбивается на несколько этапов. Информация, полученная после каждого этапа, используется для планирования исследований на следующем этапе. Планирование эксперимента позволяет варьировать ряд факторов и получать одновременно количественные оценки всех проявляющихся эффектов. При этом, в отличие от классического регрессионного анализа, избежать корреляции между коэффициентами уравнения регрессии. При статистическом подходе математическая модель объекта или процесса представляется в общем виде полиномом  $n$ -степени, т.е. отрезком ряда Тейлора, в который разлагается неизвестная функция:

$$y(x_1, \dots, x_k) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{\substack{i,j,u=1 \\ i \neq j \neq u}}^k b_{iju} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_u + \sum_{i=1}^k b_{ii} \cdot x_i^2 + \dots$$

где  $b_0$  — свободный член;

$b_i$  — линейные эффекты;

$b_{ij}$  — эффекты парного взаимодействия;

$b_{ii}$  — квадратичные эффекты;

$b_{iju}$  — эффекты тройного взаимодействия.

Для описания объекта исследования используют так называемую систему «черный ящик» (рисунок 1).

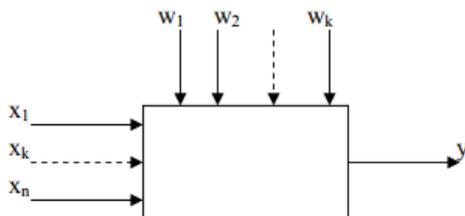


Рисунок 1 – Система «черный ящик»

Суть системы «черный ящик» состоит в изучении зависимости отклика системы  $Y$  на изменение входных измеряемых и управляемых параметров  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$  при действии случайных факторов  $W(w_1, w_2, \dots, w_k)$ , которые называют «шумом» объекта. Комплекс параметров  $X$  называют основным, он определяет условия эксперимента. Выходным параметром  $Y$  может являться любые технологические или техниче-

ские показатели исследуемого процесса. Случайным будет считаться любой фактор, не вошедший в комплекс варьируемых входных параметров. При полном факторном эксперименте полученное уравнение регрессии принимает вид полинома первой степени, пример поверхности отклика представлен на рисунке 2.

$$y(x_1, \dots, x_k) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \dots + \sum_{\substack{i,j,m=1 \\ i \neq j \neq m}}^k b_{ijm} \cdot x_i \cdot x_j \cdot \dots \cdot x_n$$

При планировании по схеме полного факторного эксперимента (ПФЭ) реализуются все возможные комбинации факторов на всех выбранных для исследования уровнях. Количество опытов N при ПФЭ определяется по формуле:

$$N = n^k,$$

где  $n$  – количество уровней;  
 $k$  – число факторов.

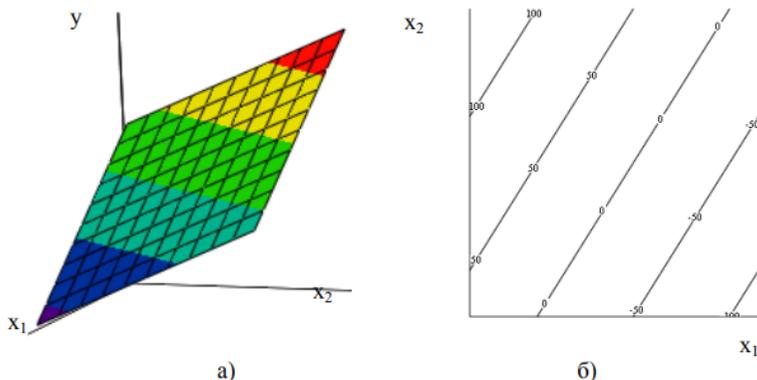


Рисунок 2 – Поверхность отклика (а) и линии равного уровня (б) для уравнения регрессии первого порядка для  $k=2$ .

Таким образом, для двухуровневого полнофакторного эксперимента необходимо провести  $2k$  опытов. Уровни факторов представляют собой границы исследуемой области по выбранному параметру (минимальное и максимальное значение фактора). Зная максимальное  $z_i \max$  и минимальное  $z_i \min$  значения технологического параметра (фактора) можно определить координаты центра плана, так называемый основной уровень  $z_i 0$ , а также интервал (шаг) варьирования  $\Delta z_i$ :

$$z_i^0 = \frac{z_i^{\max} + z_i^{\min}}{2}, \text{ где } i=1, 2, 3, \dots, k,$$

$$\Delta z_i = \frac{z_i^{\max} - z_i^{\min}}{2}.$$

Необходимо отметить, что при выборе верхнего и нижнего уровней факторов необходимо учитывать ограничения, связанные с свойствами объекта исследования:

- принципиальные ограничения (например, если исследуемый фактор «температура», то ее нижний предел не может быть ниже абсолютного нуля);

- ограничения, связанные с конкретными условиями проведения процесса (например, верхний уровень температуры нельзя поднять выше температуры плавления материала, из которого сделан реактор);

- ограничения, связанные с условиями деградации процесса либо деструкцией изучаемого материала (параметры процесса после его полного завершения; свойства жидкости после ее испарения, свойства композиции после ее разрушения);

- ограничения, связанные с фазовыми переходами вещества, либо составляющих его компонентов (при достижении веществом температуры плавления; при условиях абляции либо сублимации добавок; либо плавления добавок);

- ограничения, связанные с условиями соблюдения техники безопасности при изучении данного процесса;

- ограничения, связанные с изменением экологической ситуации (использование веществ свыше предельно допустимой концентрации; проведение экспериментов, повлекших за собой ухудшение экологической ситуации);

- ограничения, связанные с технико-экономическими соображениями (дефицитность отдельных элементов, стоимость сырья, и т.д.).

На выбор интервала варьирования так же накладываются ограничения: он не может быть меньше ошибки, с которой экспериментатор фиксирует уровень фактора, и не может быть настолько большим, что верхний и нижний уровень оказались за пределами области определения. От систем координат  $z_1, \dots, z_k$  необходимо перейти к новой безразмерной системе координат  $x_1, \dots, x_k$  с помощью линейного преобразования:

$$x_i = \frac{z_i - z_i^0}{\Delta z_i}, \text{ где } i=1, 2, 3, \dots, k.$$

В безразмерной системе координат верхний уровень – +1, нижний уровень – -1, координаты центра равны нулю и совпадают с началом координат (рисунок 3).

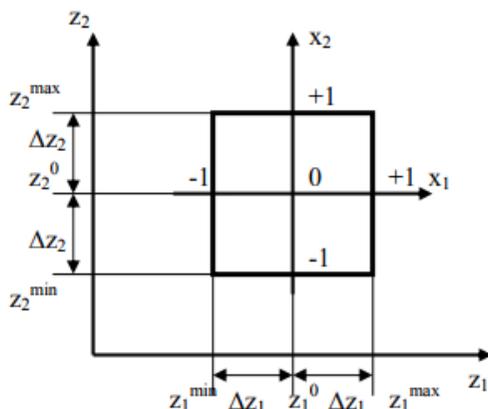


Рисунок 3 – Полный факторный эксперимент

Расположение экспериментальных точек в факторном пространстве  $2^2$  для полного факторного эксперимента при  $k=2$  показано на рисунке 3. Точки плана  $2^2$  задаются координатами вершин квадрата, а точки плана  $2^3$  – координатами вершин куба.

Таблица 1 – Полный факторный эксперимент для трех факторов

Номер опыта	Факторы в натуральном масштабе			Факторы в безразмерной системе координат			выходной параметр
	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	$z_1^{\min}$	$z_2^{\min}$	$z_3^{\min}$	-1	-1	-1	$y_1$
2	$z_1^{\max}$	$z_2^{\min}$	$z_3^{\min}$	+1	-1	-1	$y_2$
3	$z_1^{\min}$	$z_2^{\max}$	$z_3^{\min}$	-1	+1	-1	$y_3$
4	$z_1^{\max}$	$z_2^{\max}$	$z_3^{\min}$	+1	+1	-1	$y_4$
5	$z_1^{\min}$	$z_2^{\min}$	$z_3^{\max}$	-1	-1	+1	$y_5$
6	$z_1^{\max}$	$z_2^{\min}$	$z_3^{\max}$	+1	-1	+1	$y_6$
7	$z_1^{\min}$	$z_2^{\max}$	$z_3^{\max}$	-1	+1	+1	$y_7$
8	$z_1^{\max}$	$z_2^{\max}$	$z_3^{\max}$	+1	+1	+1	$y_8$

Матрица планирования полного факторного эксперимента для трех факторов представлена в таблице 1. В этом случае число возможных комбинаций из трех факторов на двух уровнях равно  $2^3=2*2*2=8$ .

Для получения расширенной матрицы планирования с фиктивной переменной, представленной в таблице 2, вводится столбец с так называемой фиктивной переменной  $x_0 = 1$ .

Таблица 2 – Полный факторный эксперимент для трех факторов с фиктивной переменной

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_0$	$y$
1	2	3	4	5	6
1	-1	-1	-1	+1	$y_1$
2	+1	-1	-1	+1	$y_2$
3	-1	+1	-1	+1	$y_3$
4	+1	+1	-1	+1	$y_4$
5	-1	-1	+1	+1	$y_5$
6	+1	-1	+1	+1	$y_6$
7	-1	+1	+1	+1	$y_7$
8	+1	+1	+1	+1	$y_8$

Биотехнологические процессы представляют собой комплекс взаимосвязанных и протекающих в сложной взаимозависимости явлений, описание которых затрудняется необходимостью установления закономерностей протекания элементарных процессов и их взаимодействия и взаимовлияния друг на друга. Эти процессы относят к классу стохастических, в котором изменение определяющих величин происходит беспорядочно и часто дискретно. При этом значение выходной величины не находится в однозначном соответствии с входной. Для описания стохастических процессов используют статистико-вероятностные методы.

Одним из методов, хорошо зарекомендовавшим себя в решении такого рода задач, является метод полного факторного эксперимента, в основе которого лежит способ построения зависимости влияния определяющих факторов на параметр оптимизации в виде отрезка степенного ряда Тейлора.

Метод полного факторного эксперимента включает в себя последовательные этапы математического моделирования:

1. Выбор параметра (или параметров) оптимизации и влияющих факторов.
2. Выбор основного уровня и интервала варьирования по каждому фактору.
3. Проверка воспроизводимости результатов эксперимента.

4. Собственно построение математической модели с вычислением коэффициентов уравнения регрессии.

5. Проверка адекватности уравнения регрессии.

6. Инженерная интерпретация уравнения регрессии.

Выбор параметра (или параметров) оптимизации, влияющих факторов, а также выбор основного уровня и интервала варьирования по каждому фактору подробно рассматриваются в лекционном курсе. На лабораторных занятиях студенты приобретают навыки решения задач проверки воспроизводимости результатов эксперимента, построения математической модели и проверки её адекватности на ЭВМ.

Цель курсовой работы: развитие у студентов практических навыков использования инструментария полного факторного эксперимента при исследовании биотехнологических процессов. Студенты должны приобрести навыки постановки эксперимента, определения исследуемых факторов и области планирования эксперимента, составления матриц планирования полного факторного эксперимента, расчётов коэффициентов регрессии.

При выполнении курсовой работы студенты должны научиться работать с математическими моделями. Перед студентами стоит задача изучения методов планирования полного факторного эксперимента применительно к технологическим задачам. Студенты должны освоить принципы составления матрицы планирования полного факторного эксперимента, проводить расчёт коэффициентов регрессии, использовать статистические критерии для оценки однородности, нормальности экспериментальных данных, значимости коэффициентов и адекватности полученной математической модели. Студенты должны научиться работать с полученной моделью, строить изолинии.

## **2 ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕКСТА ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ**

### **2.1 Общие требования**

Все листы пояснительной записки должны быть сброшюрованы в папки формата А4 (210×297 мм).

Текст пояснительной записки должен быть выполнен аккуратно литературным и технически грамотным языком на одной стороне листа формата А4 с применением печатающих и графических устройств вывода ЭВМ (ГОСТ 2.004). Текст пояснительной записки печатается в любом текстовом редакторе, шрифтом Times New Roman, размером 12 пт, с полуторным интервалом. Режим выравнивания: «по ширине» (двухстороннее выравнивание).

Вписывать в текст записки, изготовленной с применением печатающих и графических устройств ЭВМ, отдельные слова, формулы, условные знаки (рукописным способом), а также выполнять иллюстрации следует вручную с чёрной пастой.

Опечатки, описки и графические неточности, обнаруженные в процессе выполнения записки, допускается исправлять закрашиванием белой краской.

Оформление пояснительной записки в общем случае должно вестись в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105.

### **2.2 Построение текста**

Текст пояснительной записки должен быть разделён на разделы, подразделы, а в случае необходимости – пункты, подпункты.

Разделы должны иметь порядковые номера в пределах всей пояснительной записки, обозначенные арабскими цифрами без точки и записанные прописными буквами по центру. Подразделы должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номеров раздела и подраздела, разделённых точкой. В конце номера подраздела точка не ставится.

«ВВЕДЕНИЕ», «СОДЕРЖАНИЕ», «СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ» не нумеруются. Разделы, как и подразделы, могут состоять из одного или нескольких пунктов.

Если записка не имеет подразделов, то нумерация пунктов в ней должна быть в пределах каждого раздела, и номер пункта должен состоять из номера раздела и номера пункта, разделённых точкой. В конце номера пункта точка не ставится. Если записка имеет подразделы,

то нумерация пунктов должна быть в пределах подраздела и номер пункта должен состоять из номеров раздела, подраздела и пункта, разделённых точкой.

Если раздел или подраздел состоит из одного пункта, он также нумеруется.

Если текст записки подразделяется только на пункты, они нумеруются порядковыми номерами в пределах записки.

Пункты при необходимости, могут быть разбиты на подпункты, которые должны иметь порядковую нумерацию в пределах каждого пункта, например: 4.2.1.1, 4.2.1.2, 4.2.1.3 и т.д. При составлении содержания в его перечень вносят только разделы, пункты разделов и пункты подразделов; подпункты в содержание не включаются.

Внутри пунктов или подпунктов могут быть приведены перечисления. Перед каждой позицией перечисления следует ставить дефис или, при необходимости ссылки в тексте записки на одно из перечислений, строчную букву, после которой ставится скобка. Для дальнейшей детализации перечислений необходимо использовать арабские цифры, после которых ставится скобка, а запись производится с абзацного отступа.

Разделы и подразделы должны иметь заголовки. Пункты, как правило, заголовков не имеют. Каждый пункт, подпункт и перечисления записывают с абзацного отступа.

Наименования разделов и подразделов должны быть сформулированы таким образом, чтобы чётко и кратко отражать их содержание.

Заголовки разделов следует печатать прописными буквами по центру, подразделов – с прописной буквы без точки в конце, не подчёркивая. Переносы слов в заголовках не допускаются. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

Каждый раздел записки следует начинать с нового листа (страницы). Не следует помещать заголовки разделов на отдельных листах, подчеркивать и ставить в конце точку.

Если наименование подраздела имеет несколько строк, то последующие строчки пишутся от левого края поля текста.

*Расстояние между заголовком и текстом при выполнении записки должно быть равно трем интервалам. Расстояние между заголовками раздела и подраздела – два интервала.*

### **2.3 Размер полей текста**

Текст пояснительной записки к конструкторским и технологическим документам оформляется в соответствии с требованиями

ГОСТ 2.105 в рамке: поле слева – 20 мм, справа, сверху, снизу – 5 мм.

При написании текста расстояние от рамки формы до границ текста следует оставлять: в начале строки не менее 5 мм, в конце строки – не менее 3 мм. Расстояние от верхней строки текста до верхней рамки должно быть не менее 10 мм. Расстояние от нижней строки текста до нижней рамки основной надписи также должно быть не менее 10 мм.

Абзацный отступ должен быть одинаковым по всему тексту и равен 12,5 мм. Не допускается оформление абзацного отступа табулятором или пробелами.

## **2.4 Изложение текста**

Текст записки курсовой работы должен быть точным, логически последовательным, четким и не допускать различных толкований. Орфография и пунктуация текста должны соответствовать ныне действующим правилам.

В записке должны применяться научно-технические термины, обозначения и определения, установленные соответствующими стандартами, а при их отсутствии – общепринятые в научно-технической литературе.

Если в записке принята специфическая терминология, то в конце её (после списка использованных источников) обязательно должен быть перечень принятых терминов с соответствующими разъяснениями. Перечень включают в содержание записки.

## **2.5 Оформление ссылок**

На материалы, взятые из литературы и других источников (утверждения, формулы, цитаты и т.п.), в тексте пояснительной записки должны быть даны ссылки с указанием номера источника по списку использованной литературы. Номер ссылки проставляется арабскими цифрами в квадратных скобках, например: [4-8, 25, 26] или [15].

Ссылаться следует на документ в целом или его разделы и приложения. Ссылки на подразделы, пункты, таблицы и иллюстрации не допускаются, за исключением подразделов, пунктов, таблиц и иллюстраций данного документа.

При ссылке на формулу в тексте необходимо указать её полный номер в скобках, например: «...в формуле (1)» или «...в формуле (3.1)». Ссылаться на перечень уравнений следует (1)–(6), неверно считать оформленной ссылкой (1–6).

При ссылках на иллюстрации следует писать «в соответствии с

рисунком 2» при сквозной нумерации и «в соответствии с рисунком 1.2» при нумерации в пределах раздела.

При ссылке на таблицу следует писать слово «Таблица» с указанием её номера, например: «Таблица 3» при сквозной нумерации и «Таблица 2.1» при нумерации в пределах раздела.

При ссылке на приложения в скобках без сокращения пишется слово «Приложение» и его обозначение, например: (Приложение А).

При ссылках на стандарты и технические условия допускается указывать в скобках или через запятую только обозначение документа и его номер без указания наименования. Повторные ссылки на формулы, таблицы, приложения следует давать с сокращенным словом «смотри», например: (см. рисунок 3.5), (см. Приложение Б), (см. таблицу 1.4).

## **2.6 Иллюстрации**

Количество иллюстраций должно быть достаточным для пояснения излагаемого текста.

Иллюстрации могут быть представлены в виде графиков, эскизов, чертежей, фотографий, схем, диаграмм и т.д.

Все иллюстрации, помещаемые в тексте записки и приложениях, именуется рисунками.

Рисунки должны располагаться непосредственно после ссылки на них в тексте или на следующей странице.

Иллюстрации, за исключением иллюстраций приложений, следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Если рисунок один, то он обозначается, например, «Рисунок 1».

Иллюстрации каждого приложения обозначают отдельной нумерацией арабскими цифрами с добавлением перед цифрой обозначений приложения. Например, «Рисунок А.3».

## 2.7 Оформление таблиц

Таблицы применяют для лучшей наглядности и удобства сравнения показателей. В тексте пояснительной записки следует помещать итоговые и наиболее важные таблицы. Таблицы вспомогательного и справочного характера помещают в приложениях пояснительной записки. Таблицу следует располагать непосредственно после текста, где она упоминается впервые, или на следующей странице, а, при необходимости, в приложении к документу.

Каждая таблица должна иметь смысловой заголовок (название). Заголовок должен быть точным, кратким и отражать содержание таблицы. В левом верхнем углу (без абзацного отступа) над таблицей помещают слово «Таблица» с указанием её номера и через тире название таблицы, которое следует выполнять строчными буквами (кроме первой прописной). В конце заголовков таблиц точки не ставят, заголовки указывают в единственном числе и не подчеркивают.

Таблицы, за исключением таблиц приложений, следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией.

Таблицы каждого приложения обозначают отдельной нумерацией арабскими цифрами с добавлением перед цифрой обозначения приложения.

Если в записке одна таблица, она должна быть обозначена «Таблица 1» или «Таблица В.1», когда она приведена в Приложении В.

### 3 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

#### 3.1 Пример выполнения расчетной части курсовой работы

Задание на курсовую работу: Изучить влияние на параметр оптимизации  $Y$ , в качестве которого выбрана концентрация дрожжевых клеток *Saccharomyces cerevisiae* в культуральной жидкости при культивировании, следующих факторов:

- 1) Концентрация глюкозы в питательной среде, % (фактор  $X_1$ );
- 2) Концентрация в питательной среде растворенного кислорода, мг/дм<sup>3</sup> (фактор  $X_2$ );
- 3) Продолжительность культивирования, час (фактор  $X_3$ );

Для изучаемых факторов  $X_1$ – $X_3$  были выбраны основные уровни и интервалы варьирования, определены верхние и нижние уровни (таблица 3).

Таблица 3 – Значения уровней факторов и интервалов варьирования в натуральных и кодированных величинах

Показатель	Фактор $X_1$		Фактор $X_2$		Фактор $X_3$	
	натуральное значение, %	кодированное значение	натуральное значение, мг/дм <sup>3</sup>	кодированное значение	натуральное значение, час	кодированное значение
Основной уровень	10,0	0	4,0	0	60	0
Интервал варьирования	5,0	–	4,0	–	20	–
Нижний уровень	5,0	–1	0,0	–1	40	–1
Верхний уровень	15,0	+1	8,0	+1	80	+1

На каждом из выбранных уровней была проведена серия из пяти экспериментов, результаты которых представлены в таблице 4. В качестве функции отклика использовали значение концентрации дрожжевых клеток *Saccharomyces cerevisiae* в культуральной жидкости, определяемое методом прямого подсчета клеток в камере Горяева при соответствующем разведении.

Таблица 4 – Эксперимент для проверки воспроизводимости опытов

Серия	№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Значения Y <sub>1</sub> , млн/мл
1	1	+1	+1	+1	16,4
	2	+1	+1	+1	18,5
	3	+1	+1	+1	14,7
	4	+1	+1	+1	19,4
	5	+1	+1	+1	18,7
2	1	-1	-1	-1	9,8
	2	-1	-1	-1	10,2
	3	-1	-1	-1	7,4
	4	-1	-1	-1	8,9
	5	-1	-1	-1	11,2
3	1	0	0	0	12,7
	2	0	0	0	13,8
	3	0	0	0	11,7
	4	0	0	0	15,2
	5	0	0	0	13,8

Таблица 5 – Матрица планирования полного факторного эксперимента

№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Значения Y <sub>1эксп</sub> , млн/мл
1	+1	+1	+1	16,7
2	+1	+1	-1	12,6
3	+1	-1	+1	9,8
4	+1	-1	-1	7,9
5	-1	+1	+1	13,4
6	-1	+1	-1	11,6
7	-1	-1	+1	10,7
8	-1	-1	-1	6,8

Обработка результатов ведется по следующему алгоритму.

Для каждой серии параллельных опытов вычисляют среднее арифметическое значение функции отклика по формуле

$$\bar{Y}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k Y_{j,i} \quad (1)$$

где  $j$  – номер серии параллельных опытов;

$k$  – число параллельных опытов, проведенных при одинаковых условиях;

$Y_{j,i}$  – текущее значение параметра оптимизации  $i$ -го опыта  $j$ -й серии.

Для каждой серии параллельных опытов вычисляется оценка дисперсии  $s_j^2$  по формуле:

$$s_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum (Y_{j,i} - \bar{Y}_j)^2 \quad (2)$$

Переносим данные таблицы 2 на лист созданной книги Microsoft Excel (рисунок 4).

Расчет  $Y_{cp}$  и  $s_j^2$  производим путем программирования соответствующих ячеек книги Microsoft Excel. Ввод формулы в ячейку всегда начинается со знака равенства.

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Серия	№ опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$	Значения $Y_1$ , мл/мл	$\bar{Y}_j$	$s_j^2$
1								
2	1	1	1	1	1	16,4		
3		2	1	1	1	18,5		
4		3	1	1	1	14,7		
5		4	1	1	1	19,4		
6		5	1	1	1	18,7		
7	2	1	-1	-1	-1	9,8		
8		2	-1	-1	-1	10,2		
9		3	-1	-1	-1	7,4		
10		4	-1	-1	-1	8,9		
11		5	-1	-1	-1	11,2		
12	3	1	0	0	0	12,7		
13		2	0	0	0	13,8		
14		3	0	0	0	11,7		
15		4	0	0	0	15,2		
16		5	0	0	0	13,8		

Рисунок 4 – Окно книги Microsoft Excel

Для расчета  $Y_{cp}$  активизируем (выделяем мышью) некоторую ячейку книги в нужном месте (в примере G4). После этого при помощи клавиатуры вводим знак равенства, а затем, используя мастер функций, выбираем в категории «Статистические» функцию «среднее значение» – СРЗНАЧ (рисунок 5) и нажимаем «ОК».

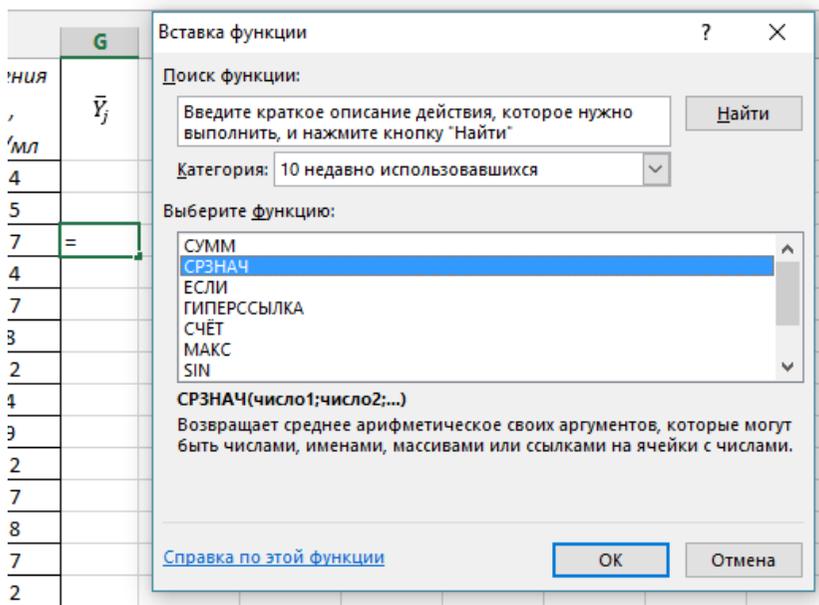


Рисунок 5 – Окно мастера функций

Для указания диапазона вычислений среднего значения указываем в поле окна «число 1» (рисунок 6) массив данных, находящихся в ячейках F2–F6, выделив правой кнопкой мыши ячейку F2 и, удерживая нажатой клавишу «Shift», ячейку F6. Заканчивается ввод формулы нажатием «Enter».

Для расчета оценки дисперсии для каждой серии параллельных опытов  $s_j^2$  активизируем ячейку H4 и вводим в неё формулу (2) следующим образом:  $= (1/2) * ((F2-G4)^2 + (F3-G4)^2 + (F4-G4)^2 + (F5-G4)^2 + (F6-G4)^2)$ . Заканчивается ввод формулы нажатием «Enter» (Рисунок 7).

Аналогичным образом для вычисления средних значений по следующим сериям параллельных опытов программируем ячейки G9 и G14. Для вычисления соответствующих оценок дисперсий второй и

третьей серий проведенных параллельных опытов ячейки Н9 и Н14. Результат расчетов представлен на рисунке 8.

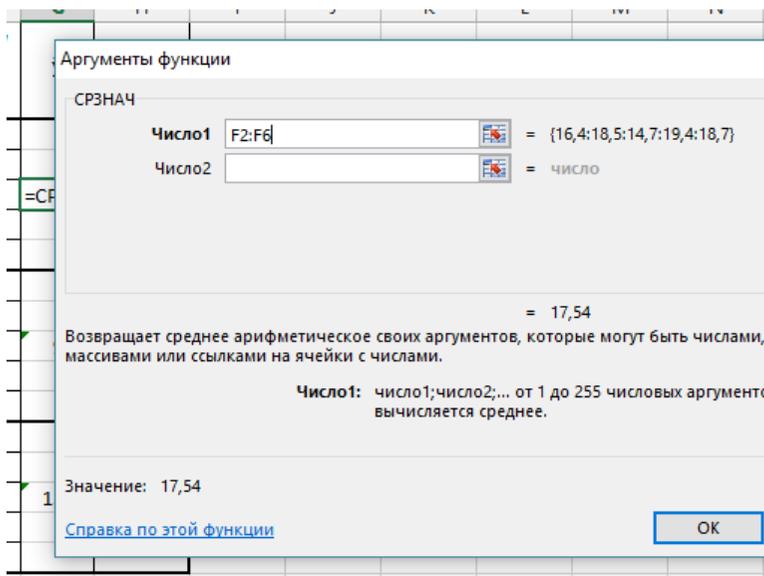


Рисунок 6 – Окно «Аргументы функции»

	F	G	H	I	J	K	L	M
Значения		$\bar{Y}_j$	$s_j^2$					
$Y_{1j}$ , млн/мл								
16,4								
18,5								
14,7		17,54	$= (1/2) * ((F2-G4)^2 + (F3-G4)^2 + (F4-G4)^2 + (F5-G4)^2 + (F6-G4)^2)$					
19,4								
18,7								

Рисунок 7 – Ввод формулы для расчета оценки дисперсии

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Серия	№ опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$	Значения $Y_j$ , млн/мл	$\bar{Y}_j$	$s_j^2$
1								
2	1	1	1	1	1	16,4		
3		2	1	1	1	18,5		
4		3	1	1	1	14,7	17,54	7,546
5		4	1	1	1	19,4		
6		5	1	1	1	18,7		
7	2	1	-1	-1	-1	9,8		
8		2	-1	-1	-1	10,2		
9		3	-1	-1	-1	7,4	9,50	4,12
10		4	-1	-1	-1	8,9		
11		5	-1	-1	-1	11,2		
12	3	1	0	0	0	12,7		
13		2	0	0	0	13,8		
14		3	0	0	0	11,7	13,44	3,466
15		4	0	0	0	15,2		
16		5	0	0	0	13,8		

Рисунок 8 – Результат расчетов

Для оценки воспроизводимости опытов определяют значение критерия Кохрена. Расчетное значение критерия Кохрена  $G_p$  находят из отношения максимальной оценки дисперсии к сумме всех дисперсий:

$$G_p = \max s_j^2 / \sum_{j=1}^N s_j^2 \quad (3)$$

и сравнивают с табличным значением критерия Кохрена, выбираемым из справочника при известных значениях общего количества дисперсий  $N$ , и числом степеней свободы  $f$ , связанным с каждой из них как  $f = k - 1$ . Если выполняется условие  $G_{расч} \leq G_{табл}$ , то опыты считаются воспроизводимыми, а оценки дисперсий – однородными.

Для удобства автоматизированной обработки возможно воспользоваться условным форматированием с использованием функции «ЕСЛИ» (рисунок 9).

Оценки однородных дисперсий можно усреднить и найти величину, называемую оценкой дисперсии воспроизводимости (рисунок 7):

$$s_Y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_j^2, \quad (4)$$

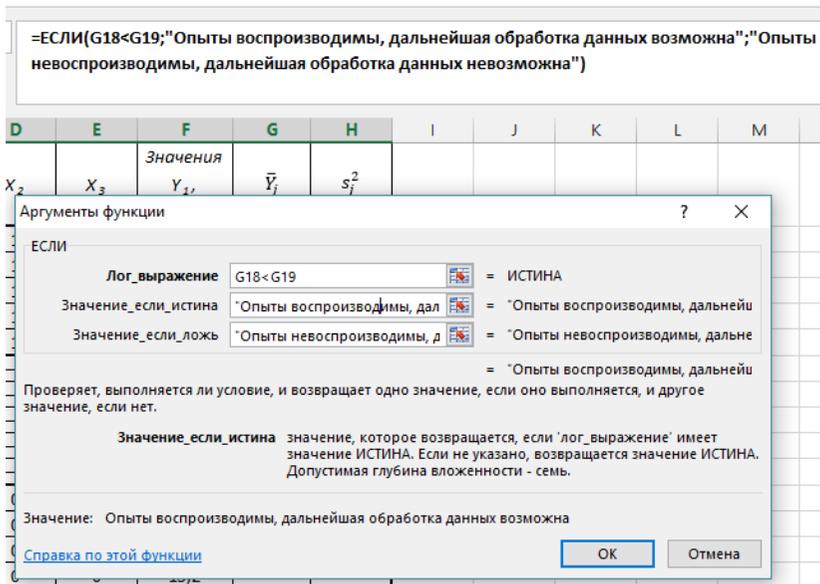


Рисунок 9 – Использование функции «ЕСЛИ»

17						13,0	
18						Расчетное значение критерия Кохрена	0,499
19						Табличное значение критерия Кохрена	0,746
20							
21						Опыты воспроизводимы, дальнейшая обработка данных возможна	
22							
23						Оценка дисперсии воспроизводимости	5,044
24						Связанное с ней число степеней свободы	6
25							
26						Оценка дисперсии среднего значения	1,681
27						Связанное с ней число степеней свободы	6
28							

Рисунок 10 – Определение дисперсий воспроизводимости и среднего значения

с которой связано число степеней свободы

$$f = N(k - 1). \quad (5)$$

Оценку дисперсии среднего значения рассчитывают по формуле

$$s_{\bar{Y}}^2 = \frac{s_Y^2}{k}. \quad (6)$$

С ней также связано число степеней свободы

$$f = N(k - 1). \quad (7)$$

Результаты вычислений и выводы о воспроизводимости результатов эксперимента по параметру оптимизации  $Y$  представлены на рисунке 8.

Расчетное значение критерия Кохрена

$$Gp = \frac{2,333}{2,333+0,413+0,04} = 0,837.$$

Табличное значение критерия Кохрена  $G_{табл} = 0,871$

$0,837 < 0,871$  - опыты воспроизводимы.

Расчет коэффициентов уравнения регрессии ведется по формулам (8)-(10) по исходным данным, представленным в таблице 5.

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Y_j; \quad (8)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ji} Y_j; \quad (9)$$

$$b_{lm} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{jl} X_{jm} Y_j, \text{ где } l \neq m. \quad (10)$$

Оценка значимости коэффициентов уравнения регрессии проводится по условию

$$|b| \geq s_b t, \quad (11)$$

где  $b$  - коэффициент уравнения регрессии;

$t$  - критерий Стьюдента;

$s_b$  - оценка коэффициента уравнения регрессии, определяемая по формуле

$$s_b = \sqrt{\frac{s_Y^2}{N}}. \quad (12)$$

Адекватность уравнения регрессии проверяется с помощью критерия Фишера:

$$Fp = \frac{\max(s_{a0}^2, s_Y^2)}{\min(s_{a0}^2, s_Y^2)}, \quad (13)$$

где  $s_{a0}^2$  - оценка дисперсии адекватности. В числителе последней дроби находится большая, а в знаменателе - меньшая из указанных оценок дисперсий.

Оценку дисперсии адекватности вычисляют по формуле

$$s_{a0}^2 = \frac{1}{N-B} \sum (Y_j^3 - Y_j^p)^2, \quad (14)$$

где  $B$  - число коэффициентов регрессии искомого уравнения, включая свободный член;

$Y_j^3, Y_j^p$  - экспериментальное и расчетное значение функции отклика в  $j$ -том опыте;

$N$  - число опытов полного факторного эксперимента.

С дисперсией адекватности связано число степеней свободы

$$f = N - B. \quad (15)$$

Расчетное значение критерия Фишера выбирается из Приложения Б. Уравнение регрессии считается адекватным, если выполняется условие

$$F_p \leq F_{табл} . \quad (16)$$

Расчеты по приведенному выше алгоритму проводят в Microsoft Excel путем программирования ячеек электронной таблицы.

### Пример расчета:

Вводим в ячейку A12 текст «Расчетное значение критерия Кохрена», а в ячейку A13 - текст «Табличное значение критерия Кохрена». В ячейку E12 вводим формулу (3) как = МАКС(G3:G9)/СУММ(G3:G9), а в ячейку E13 – табличное значение критерия Кохрена (Приложение 1).

Для сравнения расчетного и табличного значений критерия Кохрена используем логическую функцию «ЕСЛИ», программируя поле «Лог\_выражение» как F12<F13, поле «Значение\_если\_истина» как «опыты воспроизводимы», а поле «Значение\_если\_ложь» как «опыты невоспроизводимы» (рисунок 11).

Далее по формулам (4) - (7) проводится расчет оценки дисперсии воспроизводимости, оценки дисперсии среднего значения и связанных с ними значений числа степеней свободы.

Итоговый вид расчета проверки воспроизводимости результатов эксперимента представлен на рисунке 12.

Расчет коэффициентов уравнения регрессии проводится по формулам (8) – (10).

Создаем дополнительно таблицу для расчетов коэффициентов уравнения регрессии (рисунок 13).

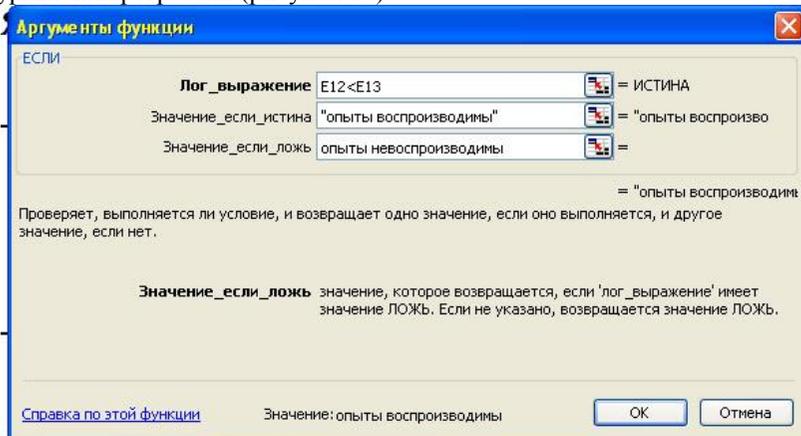


Рисунок 11 – Окно «Аргументы функции»

В ячейку B11, используя мастер функций, вводим формулу, по которой будет производиться расчет коэффициента  $b_0$  (рисунок 14).

Таким же образом, используя мастер функций, проводится вычисление остальных коэффициентов уравнения регрессии.

Как показывает практика создания математической модели с использованием метода полного факторного эксперимента, для точности предсказания результатов и адекватности полученного уравнения регрессии, можно не исключать из него элементы с незначимыми коэффициентами уравнения регрессии. Поэтому проверку значимости коэффициентов уравнения регрессии не проводят.

Полученное уравнение регрессии имеет вид:

$$Y_1 = 11.1875 + 0.5625X_1 + 2.3875X_2 + 1.4625X_3 + 0,5125X_1X_2 + 0,0375X_2X_3 - 0,0125 * X_1X_3$$

Проверка адекватности полученного уравнения проводится стандартным методом при помощи сравнения табличного и расчетного значений критерия Фишера.

Решение этой задачи требует вычисления значений  $Y_{1\text{эксп}}$ . Для этого в уравнение регрессии построчно подставляются значения  $X_1$ - $X_3$  из табл. 5, соответствующие условиям проведения каждого из опытов полного факторного эксперимента и методом программирования ячеек проводятся соответствующие вычисления (рисунок 15).

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Серия	№ опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$	Значения $Y_1$ , млн/мл	$\bar{Y}_j$	$s_j^2$
1								
2	1	1	1	1	1	16,4		
3		2	1	1	1	18,5		
4		3	1	1	1	14,7	17,54	7,546
5		4	1	1	1	19,4		
6		5	1	1	1	18,7		
7	2	1	-1	-1	-1	9,8		
8		2	-1	-1	-1	10,2		
9		3	-1	-1	-1	7,4	9,50	4,12
10		4	-1	-1	-1	8,9		
11		5	-1	-1	-1	11,2		
12	3	1	0	0	0	12,7		
13		2	0	0	0	13,8		
14		3	0	0	0	11,7	13,44	3,466
15		4	0	0	0	15,2		
16		5	0	0	0	13,8		
17								
18							Расчетное значение критерия Кохрена	0,499
19							Табличное значение критерия Кохрена	0,746
20								
21	Опыты воспроизводимы, дальнейшая обработка данных возможна							
22								
23							Оценка дисперсии воспроизводимости	5,044
24							Связанное с ней число степеней свободы	6
25								
26							Оценка дисперсии среднего значения	1,681
27							Связанное с ней число степеней свободы	6
28								

Рисунок 12 – Результаты расчета

Проверка адекватности полученного уравнения проводится стандартным методом при помощи сравнения табличного и расчетного значений критерия Фишера.

Решение этой задачи требует вычисления значений  $Y_{1\text{эксп}}$ . Для этого в уравнение регрессии построчно подставляются значения  $X_1$ - $X_3$  из таблицы 5, соответствующие условиям проведения каждого из опытов полного факторного эксперимента и методом программирования ячеек проводятся соответствующие вычисления (рисунок 15).

Матрица планирования ПФЭ					
Номер опыта	X1	X2	X3	Значения Y1эксп, млн/мл	
1	+1	+1	+1	16,7	
2	+1	+1	-1	12,6	
3	+1	-1	+1	9,8	
4	+1	-1	-1	7,9	
5	-1	+1	+1	13,4	
6	-1	+1	-1	11,6	
7	-1	-1	+1	10,7	
8	-1	-1	-1	6,8	
	b0=	11,1875			
	b1=	0,5625			
	b2=	2,3875			
	b3=	1,4625			
	b12=	0,5125			
	b13=	0,0375			
	b23=	0,0125			

Рисунок 13 – Расчет коэффициентов уравнения регрессии

Затем по формуле (14) рассчитывается значение дисперсии адекватности, а по формуле (15) – связанное с ней число степеней свободы.

Алгоритм расчета критерия Фишера заключается в сравнении дисперсии воспроизводимости с дисперсией адекватности и делении большего числа на меньшее. Программирование ячейки I19 заключается во вводе в нее формулы =МАКС(F19;F22)/МИН(F19;F22). Табличное значение критерия Фишера выбирается по Приложению 2 и вводится в ячейку I20.

Для сравнения расчетного и табличного значений критерия Фишера используем логическую функцию «ЕСЛИ», программируя поле «Лог\_выражение» как I19<I20, поле «Значение\_если\_истина» как «уравнение регрессии адекватно», а поле «Значение\_если\_ложь» как «уравнение регрессии неадекватно» (рисунок 16).

	A	B	C	D	E	F	G	H
25								
26		Оценка дисперсии среднего значения					1,681	
27		Связанное с ней число степеней свободы					6	
28								
29		Матрица планирования ПФЭ						
30		Номер опыта		X1	X2	X3	Значения Y1эксп, млн/мл	
31		1		1	1	1	16,7	
32		2		1	1	-1	12,6	
33		3		1	-1	1	9,8	
34		4		1	-1	-1	7,9	
35		5		-1	1	1	13,4	
36		6		-1	1	-1	11,6	
37		7		-1	-1	1	10,7	
38		8		-1	-1	-1	6,8	
39								
40		b0=	=(СРЗНАЧ(G31:H38))					

Рисунок 14 – Расчет коэффициента уравнения регрессии  $b_0$

Правописание		Специальные возможности		Подробные сведения		Язык		Примечания		Защит		
I31		✕ ✓ f_x		=С\$40+С\$41*Д31+С\$42*Е31+С\$43*F31+С\$44*Д31*Е31+С\$45*Д31*F31+М10*Е31*F31								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
25												
26		Оценка дисперсии среднего значения					1,681					
27		Связанное с ней число степеней свободы					6					
28												
29		Матрица планирования ПФЭ										
30		Номер опыта		X1	X2	X3	Значения Y1эксп, млн/мл	Y1расч				
31		1		1	1	1	16,7	16,15				
32		2		1	1	-1	12,6	13,15				
33		3		1	-1	1	9,8	10,35				
34		4		1	-1	-1	7,9	7,35				
35		5		-1	1	1	13,4	13,925				
36		6		-1	1	-1	11,6	11,075				
37		7		-1	-1	1	10,7	10,175				
38		8		-1	-1	-1	6,8	7,325				
39												
40		b0=	11,1875									
41		b1=	0,5625									
42		b2=	2,3875									
43		b3=	1,4625									
44		b12=	0,5125									
45		b13=	0,0375									
46		b23=	0,0125									

Рисунок 15 – Вычисление расчетных значений параметра оптимизации

Матрица планирования ПФЭ							
Номер опыта	X1	X2	X3	Значения Y1эксп, млн/мл	Y1расч	Дисп	
1	1	1	1	16,7	16,15	0,3025	
2	2	1	-1	12,6	13,15	0,3025	
3	3	1	-1	9,8	10,35	0,3025	
4	4	1	-1	7,9	7,35	0,3025	
5	5	-1	1	13,4	13,925	0,275625	
6	6	-1	1	11,6	11,075	0,275625	
7	7	-1	-1	10,7	10,175	0,275625	
8	8	-1	-1	6,8	7,325	0,275625	
9							
0	b0=	11,1875					
1	b1=	0,5625					
2	b2=	2,3875					
3	b3=	1,4625					
4	b12=	0,5125					
5	b13=	0,0375					
6	b23=	0,0125					
7							
8	Дисперсия адекватности:	2,3125					
9	Связанное с ней число степеней свободы:	1					
0							
1	Оценка дисперсии воспроизводимости:	5,73828125					
2	Связанное с ней число степеней свободы:	6					
3							
4	Fрасч:	2,481419					
5	Fтабл:	5,99					
6							
7	Уравнение регрессии адекватно						
8							

Рисунок 16 – Результат проверки адекватности полученного уравнения регрессии

После положительного вывода об адекватности уравнения регрессии, его подвергают инженерной интерпретации следующим образом.

Известно, что величина коэффициента уравнения регрессии - количественная мера его влияния. О характере влияния факторов говорят знаки коэффициентов. Знак «плюс» свидетельствует о том, что с увеличением значения фактора величина параметра оптимизации растет, а при знаке «минус» - убывает. На основании полученного уравнения регрессии можно сделать следующий вывод:

В исследованной области концентрации биомассы при 30<sup>0</sup>С наибольшее влияние оказывает фактор X<sub>1</sub> – концентрация углеводов, причем с увеличением его количества значение параметра оптимизации будет возрастать. Меньшее влияние оказывает время аэрации; характер этого влияния отрицателен, т.е. с увеличением времени аэрации концентрация биомассы снижается. Содержание продуктов метабо-

лизма оказывает незначительное влияние на концентрацию биомассы при 0°C.

Результаты расчета формируются в виде отдельных листов, соответствующим образом оформляются и включаются в общее тело пояснительной записки к курсовой работе.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**(обязательное)**  
**Форма задания на курсовую работу**

**А.1 Первый лист задания**  
**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Тюменский индустриальный университет»  
Кафедра «Товароведение и технология продуктов питания»

**ЗАДАНИЕ № 04**  
**НА КУРСОВУЮ РАБОТУ**

По дисциплине «Моделирование биотехнологических процессов»

Студенту группы \_\_\_\_\_ Иванову Ивану Ивановичу  
фамилия, имя, отчество

Тема:

....  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Срок исполнения работы \_\_\_\_\_

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_ Иванов Иван Иванович  
дата      подпись                      фамилия, имя, отчество

**ТЮМЕНЬ 20\_\_**



**ПРИЛОЖЕНИЕ Б  
(обязательное)**

**Пример титульного листа пояснительной записки  
к курсовой работе**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Тюменский индустриальный университет»

Технологический факультет/Отделение внеочных форм обучения  
Кафедра Товароведения и технологии продуктов питания  
Направление 19.04.01 Биотехнология

УДК 663.551.5(079.2)

Курсовая работа защищена  
с оценкой \_\_\_\_\_  
Руководитель  
работы \_\_\_\_\_ доцент А.А. Петров  
подпись, должность, и.о. фамилия

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К КУРСОВОЙ РАБОТЕ  
по дисциплине «Моделирование биотехнологических процессов»**

**КР.19.04.04.XX-XXXX/XXXX.XXX.2020.00 ПЗ**

---

....

---

Студент группы \_\_\_\_\_

Пальмер Ирина Владимировна

Руководитель работы доцент, к.т.н.

А.А. Петров

ТЮМЕНЬ, 2024

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
**(рекомендуемое)**  
**Пример оформления содержания пояснительной записки**  
**к курсовой работе**

**СОДЕРЖАНИЕ**

ЗАДАНИЕ .....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОПИСАНИЕ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА.....	7
1.1 Особенности производства продукта .....	7
1.2 Сравнение способов производства продукта.....	9
1.3 Технологическая схема производства продукта.....	17
2 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ .....	18
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	39
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	40

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное)

### Пример оформления библиографических ссылок в списке использованных источников

#### **Книги, брошюры**

Храмцов, А.Г. Молочная сыворотка / А.Г. Храмцов. – М.: Агропромиздат, 1990. – 128 с.

Твердохлеб, Г.В. Технология молока и молочных продуктов / Г.В. Твердохлеб, З.Х. Диланян, Л.В. Шиллер. – М.: Агропроимиздат, 1991. – 238 с.

Нетрусов, А.И. Практикум по микробиологии / А.И. Нетрусов [и др.]. – М.: Академия, 2005. – 608 с.

#### **Книга под редакцией**

Управление персоналом предприятия: учебное пособие / под ред. И.И. Иванова. – М.: Астрель, 2002. – 503 с.

Казьмин, В.Д. Управление персоналом предприятия: учебное пособие / В.Д. Казьмин; под ред. И.И. Иванова. – М.: Астрель, 2002. – 503 с.

#### **Статья из журнала**

Мошинский, А.И. Оптимизация процесса разделения на центрифуге / А.И. Мошинский // ЖПХ. – 1985. – Т. 63. – № 9. – С. 2051-2054.

Мельникова, В.С. Очистка сточных вод полистирола методом напорной флотации / В.С. Мельникова, В.Г. Калюжнов, В.А. Микишев // Пластические массы. – 1996. – № 5. – С. 41-43.

Генетико-демографические аспекты формирования городов Кузбасса / М. Б. Лавряшина [и др.] // Вестник Кемеровского университета. – 2002. – Вып. 2. – С. 77–82.

#### **Статьи из книги или другого разового издания**

1. Волков, Ю.П. Выгрузка осадка из ротора центрифуги / Ю.П. Волков // Материалы и технологии XXI века: Тез. докл. I Всероссийской научно-практ. конф. – М.: ЦЭИ «Химмаш», 2000. – С. 236-238.

#### **Статья из сборника научных трудов, журнала**

Кулакова, Г. И. Организация учебного процесса / Г. И. Кулакова // Университетская библиотека на рубеже веков / сост. И. Г. Шевчук. – М., 2002. – С. 43–50.

Уголев, Б. Н. Влияние неоднородности строения древесины на локальную усушку шпона / Б. Н. Уголев, П. А. Аксенов // Технология и оборудование для переработки древесины : сб. науч. тр. – Вып. 326. – М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2004. – С. 13–16.

Darvin's experimental natural history / Н. J. McLauch // J. Hist. Biol. – 1986. – Vol. 19, N 1. – P. 79–130.

### **Электронные ресурсы**

#### **А) web-страница**

Мелентьева, Ю. Переработка отходов бродильных производств. Лекция 3. Утилизация пивной дробины [Электронный ресурс] / Юлия Мелентьева // Режим доступа: <http://lib.32september.ru/2004/19/19.htm>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 1.11.2008).

#### **Б) электронный журнал**

Исследовано в России [Электронные ресурсы] : научный журнал / Московский физико-технический институт. – Электрон. журн. – Долгопрудный : МФТИ, 1998. – Режим доступа: <http://zhurnal.mipt.rssi.ru>. – Систем. требования: IBM PC ; Windows 3.xx/95 ; Acrobat Reader 3.0. – Загл. с экрана.

#### **В) статья из электронного журнала**

Белоус, Н. А. Прагматическая реализация коммуникативных стратегий в конфликтном дискурсе / Н. А. Белоус // Мир лингвистики и коммуникации: электронный научный журнал. – 2006. – № 4 [Электронный ресурс]. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: [http://www.tverlingua.by.ru/archive/005/5\\_3\\_1.htm](http://www.tverlingua.by.ru/archive/005/5_3_1.htm). – (Дата обращения: 15.12.2007).

#### **Г) сайт**

Российская государственная библиотека [Электронный ресурс] / Центр информ. технологий РГБ ; ред. Т. В. Власенко ; Web-мастер Н. В. Козлова. – Электрон. дан. – М. : Рос. гос. б-ка, 1997. – Режим доступа : <http://www.rsl.ru>. – Загл. с экрана.

#### **Д) электронная книга**

Шпринц, Лев. Книга художника: от миллионных тиражей – к единичным экземплярам [Электронный ресурс] / Л. Шпринц. – Электрон. текстовые дан. – М. : [Б. и.], 2000. – Режим доступа: <http://artbook.km.ru/news/000525.html>, свободный.

#### **Е) база данных**

Электронный каталог ГПНТБ России [Электронный ресурс] : база данных содержит сведения о всех видах, литературы, поступающей в фонд ГПНТБ России. – Электрон. дан. – М., [199-]. – Режим доступа: <http://www.gpntb.ru/win/search/help/el-cat.html>. – Загл. с экрана

#### **Нормативные документы**

1. ГОСТ Р 517721–2001 Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Входные и выходные параметры и типы соединений. Технические требования. – Введ. 2002–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 27 с.

#### **Патенты и авторские свидетельства**

1. А.с. 528120 СССР, МКИ В04В5/12. Центробежный аппарат для разделения суспензий / В.В. Вайдуков, В.И. Батуров, А.И. Бухтер (СССР). – № 3360585/25-08; заявл. 23.11.81; опубл. 30.03.83, Бюл. № 12. – 2 с.: ил.

2. Пат. 2064280 Российская Федерация МПК А23L2/39. Способ производства быстрорастворимого порошка для приготовления напитка / Андропова О.И., Касьянов Г.И., Малышев С.Д., Ицхакович А.Я., Квасенков О.И. – № 2000131736/09; заявл. 18.12.00; опубл. 20.08.02, Бюл. № 23. – 2 с.: ил.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д**  
**(обязательное)**  
**Справочные данные**

Таблица Д.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

Таблица Д.2 – 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

**ПРИЛОЖЕНИЕ Ж**  
**(обязательное)**  
**Варианты заданий**

Вариант 1.

Изучить влияние на параметр оптимизации  $Y$ , в качестве которого выбрана концентрация дрожжевых клеток *Saccharomyces bayanus* в культуральной жидкости при брожении виноградного сусла, следующих факторов:

- 1) Концентрация глюкозы в питательной среде, % (фактор  $X_1$ );
- 2) Концентрация в питательной среде растворенного кислорода, мг/дм<sup>3</sup> (фактор  $X_2$ );
- 3) Продолжительность культивирования, час (фактор  $X_3$ );

Для изучаемых факторов  $X_1$ – $X_3$  были выбраны основные уровни и интервалы варьирования, определены верхние и нижние уровни (таблица 1).

Таблица 1 – Значения уровней факторов и интервалов варьирования в натуральных и кодированных величинах

Показатель	Фактор $X_1$		Фактор $X_2$		Фактор $X_3$	
	натуральное значение, %	кодированное значение	натуральное значение, мг/дм <sup>3</sup>	кодированное значение	натуральное значение, час	кодированное значение
Основной уровень	10,0	0	4,0	0	60	0
Интервал варьирования	5,0	–	4,0	–	20	–
Нижний уровень	5,0	–1	0,0	–1	40	–1
Верхний уровень	15,0	+1	8,0	+1	80	+1

На каждом из выбранных уровней была проведена серия из пяти экспериментов, результаты которых представлены в таблице 2. В качестве функции отклика использовали значение концентрации дрожжевых клеток *Saccharomyces bayanus* в культуральной жидкости, определяемое методом прямого подсчета клеток в камере Горяева при соответствующем разведении.

Матрица планирования эксперимента и полученные экспериментальные значения представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Эксперимент для проверки воспроизводимости опытов

Серия	№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Значения Y <sub>1</sub> , млн/мл
1	1	+1	+1	+1	14,8
	2	+1	+1	+1	15,4
	3	+1	+1	+1	19,5
	4	+1	+1	+1	16,4
	5	+1	+1	+1	13,2
2	1	-1	-1	-1	12,2
	2	-1	-1	-1	10,3
	3	-1	-1	-1	9,9
	4	-1	-1	-1	8,9
	5	-1	-1	-1	7,5
3	1	0	0	0	11,3
	2	0	0	0	12,5
	3	0	0	0	14,2
	4	0	0	0	13,4
	5	0	0	0	10,5

Таблица 3 – Матрица планирования полного факторного эксперимента

№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Значения Y <sub>1эксп</sub> , млн/мл
1	+1	+1	+1	14,8
2	+1	+1	-1	11,5
3	+1	-1	+1	10,6
4	+1	-1	-1	8,9
5	-1	+1	+1	14,2
6	-1	+1	-1	10,3
7	-1	-1	+1	9,6
8	-1	-1	-1	7,9

## Вариант 2.

Изучить влияние на параметр оптимизации  $Y$ , в качестве которого выбрана концентрация дрожжевых клеток *Saccharomyces* в культуральной жидкости при брожении пивного суслу, следующих факторов:

- 1) Концентрация глюкозы в питательной среде, % (фактор  $X_1$ );
- 2) Концентрация в питательной среде растворенного кислорода, мг/дм<sup>3</sup> (фактор  $X_2$ );
- 3) Продолжительность культивирования, час (фактор  $X_3$ );

Для изучаемых факторов  $X_1$ – $X_3$  были выбраны основные уровни и интервалы варьирования, определены верхние и нижние уровни (таблица 1).

Таблица 1 – Значения уровней факторов и интервалов варьирования в натуральных и кодированных величинах

Показатель	Фактор $X_1$		Фактор $X_2$		Фактор $X_3$	
	натуральное значение, %	кодированное значение	натуральное значение, мг/дм <sup>3</sup>	кодированное значение	натуральное значение, час	кодированное значение
Основной уровень	10,0	0	4,0	0	60	0
Интервал варьирования	5,0	–	4,0	–	20	–
Нижний уровень	5,0	–1	0,0	–1	40	–1
Верхний уровень	15,0	+1	8,0	+1	80	+1

На каждом из выбранных уровней была проведена серия из пяти экспериментов, результаты которых представлены в таблице 2. В качестве функции отклика использовали значение концентрации дрожжевых клеток *Saccharomyces* в культуральной жидкости, определяемое методом прямого подсчета клеток в камере Горяева при соответствующем разведении.

Матрица планирования эксперимента и полученные экспериментальные значения представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Эксперимент для проверки воспроизводимости опытов

Серия	№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Значения Y <sub>1</sub> , млн/мл
1	1	+1	+1	+1	32,4
	2	+1	+1	+1	35,6
	3	+1	+1	+1	38,9
	4	+1	+1	+1	31,5
	5	+1	+1	+1	34,7
2	1	-1	-1	-1	22,5
	2	-1	-1	-1	21,3
	3	-1	-1	-1	19,8
	4	-1	-1	-1	24,5
	5	-1	-1	-1	22,3
3	1	0	0	0	29,8
	2	0	0	0	27,5
	3	0	0	0	26,3
	4	0	0	0	24,7
	5	0	0	0	28,6

Таблица 3 – Матрица планирования полного факторного эксперимента

№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Значения Y <sub>1эксп</sub> , млн/мл
1	+1	+1	+1	36,5
2	+1	+1	-1	27,8
3	+1	-1	+1	31,2
4	+1	-1	-1	34,8
5	-1	+1	+1	24,7
6	-1	+1	-1	22,3
7	-1	-1	+1	24,3
8	-1	-1	-1	18,6

### Вариант 3.

Изучить влияние на параметр оптимизации  $Y$ , в качестве которого выбрана концентрация спирта в культуральной жидкости при брожении пивного сусла, следующих факторов:

- 1) Концентрация глюкозы в питательной среде, % (фактор  $X_1$ );
- 2) Концентрация в питательной среде растворенного кислорода, мг/дм<sup>3</sup> (фактор  $X_2$ );
- 3) Продолжительность культивирования, час (фактор  $X_3$ );

Для изучаемых факторов  $X_1$ – $X_3$  были выбраны основные уровни и интервалы варьирования, определены верхние и нижние уровни (таблица 1).

Таблица 1 – Значения уровней факторов и интервалов варьирования в натуральных и кодированных величинах

Показатель	Фактор $X_1$		Фактор $X_2$		Фактор $X_3$	
	натуральное значение, %	кодированное значение	натуральное значение, мг/дм <sup>3</sup>	кодированное значение	натуральное значение, час	кодированное значение
Основной уровень	10,0	0	4,0	0	60	0
Интервал варьирования	5,0	–	4,0	–	20	–
Нижний уровень	5,0	–1	0,0	–1	40	–1
Верхний уровень	15,0	+1	8,0	+1	80	+1

На каждом из выбранных уровнях была проведена серия из пяти экспериментов, результаты которых представлены в таблице 2. В качестве функции отклика использовали значение концентрации спирта в культуральной жидкости, определяемое методом ГЖХ.

Матрица планирования эксперимента и полученные экспериментальные значения представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Эксперимент для проверки воспроизводимости опытов

Серия	№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Значения Y <sub>1</sub> , %
1	1	+1	+1	+1	5,7
	2	+1	+1	+1	5,9
	3	+1	+1	+1	5,4
	4	+1	+1	+1	5,5
	5	+1	+1	+1	5,5
2	1	-1	-1	-1	2,8
	2	-1	-1	-1	2,9
	3	-1	-1	-1	2,8
	4	-1	-1	-1	2,9
	5	-1	-1	-1	2,9
3	1	0	0	0	4,5
	2	0	0	0	4,5
	3	0	0	0	4,6
	4	0	0	0	4,9
	5	0	0	0	4,8

Таблица 3 – Матрица планирования полного факторного эксперимента

№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Значения Y <sub>1эксп</sub> , %
1	+1	+1	+1	5,9
2	+1	+1	-1	5,2
3	+1	-1	+1	4,8
4	+1	-1	-1	4,3
5	-1	+1	+1	5,4
6	-1	+1	-1	3,5
7	-1	-1	+1	2,4
8	-1	-1	-1	2,2

Вариант 4.

Изучить влияние на параметр оптимизации  $Y$ , в качестве которого выбрана концентрация спирта в культуральной жидкости при брожении виноградного суслу, следующих факторов:

- 1) Концентрация глюкозы в питательной среде, % (фактор  $X_1$ );
- 2) Концентрация в питательной среде растворенного кислорода, мг/дм<sup>3</sup> (фактор  $X_2$ );
- 3) Продолжительность культивирования, час (фактор  $X_3$ );

Для изучаемых факторов  $X_1$ – $X_3$  были выбраны основные уровни и интервалы варьирования, определены верхние и нижние уровни (таблица 1).

Таблица 1 – Значения уровней факторов и интервалов варьирования в натуральных и кодированных величинах

Показатель	Фактор $X_1$		Фактор $X_2$		Фактор $X_3$	
	натуральное значение, %	кодированное значение	натуральное значение, мг/дм <sup>3</sup>	кодированное значение	натуральное значение, час	кодированное значение
Основной уровень	10,0	0	4,0	0	60	0
Интервал варьирования	5,0	–	4,0	–	20	–
Нижний уровень	5,0	–1	0,0	–1	40	–1
Верхний уровень	15,0	+1	8,0	+1	80	+1

На каждом из выбранных уровнях была проведена серия из пяти экспериментов, результаты которых представлены в таблице 2. В качестве функции отклика использовали значение концентрации спирта в культуральной жидкости, определяемое методом ГЖХ.

Матрица планирования эксперимента и полученные экспериментальные значения представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Эксперимент для проверки воспроизводимости опытов

Серия	№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Значения Y <sub>1</sub> , %
1	1	+1	+1	+1	6,4
	2	+1	+1	+1	5,9
	3	+1	+1	+1	6,2
	4	+1	+1	+1	6,1
	5	+1	+1	+1	6,6
2	1	-1	-1	-1	3,4
	2	-1	-1	-1	3,3
	3	-1	-1	-1	3,1
	4	-1	-1	-1	3,6
	5	-1	-1	-1	2,9
3	1	0	0	0	5,1
	2	0	0	0	4,5
	3	0	0	0	4,6
	4	0	0	0	4,9
	5	0	0	0	4,8

Таблица 3 – Матрица планирования полного факторного эксперимента

№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Значения Y <sub>1эксп</sub> , %
1	+1	+1	+1	5,2
2	+1	+1	-1	6,2
3	+1	-1	+1	5,8
4	+1	-1	-1	4,3
5	-1	+1	+1	5,2
6	-1	+1	-1	3,8
7	-1	-1	+1	3,4
8	-1	-1	-1	2,9

Вариант 5.

Изучить влияние на параметр оптимизации  $Y$ , в качестве которого выбрана концентрация уксусной кислоты в культуральной жидкости при брожении виноградного виноматериала, следующих факторов:

- 1) Концентрация спирта в питательной среде, % (фактор  $X_1$ );
- 2) Концентрация в питательной среде растворенного кислорода, мг/дм<sup>3</sup> (фактор  $X_2$ );
- 3) Продолжительность культивирования, час (фактор  $X_3$ );

Для изучаемых факторов  $X_1$ – $X_3$  были выбраны основные уровни и интервалы варьирования, определены верхние и нижние уровни (таблица 1).

Таблица 1 – Значения уровней факторов и интервалов варьирования в натуральных и кодированных величинах

Показатель	Фактор $X_1$		Фактор $X_2$		Фактор $X_3$	
	натуральное значение, %	кодированное значение	натуральное значение, мг/дм <sup>3</sup>	кодированное значение	натуральное значение, час	кодированное значение
Основной уровень	10,0	0	4,0	0	60	0
Интервал варьирования	5,0	–	4,0	–	20	–
Нижний уровень	5,0	–1	0,0	–1	40	–1
Верхний уровень	15,0	+1	8,0	+1	80	+1

На каждом из выбранных уровнях была проведена серия из пяти экспериментов, результаты которых представлены в таблице 2. В качестве функции отклика использовали значение концентрации уксусной кислоты в культуральной жидкости, определяемое методом ГЖХ.

Матрица планирования эксперимента и полученные экспериментальные значения представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Эксперимент для проверки воспроизводимости опытов

Серия	№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Значения Y <sub>1</sub> , %
1	1	+1	+1	+1	5,68
	2	+1	+1	+1	5,47
	3	+1	+1	+1	5,24
	4	+1	+1	+1	5,16
	5	+1	+1	+1	5,37
2	1	-1	-1	-1	2,13
	2	-1	-1	-1	2,84
	3	-1	-1	-1	2,62
	4	-1	-1	-1	2,34
	5	-1	-1	-1	2,54
3	1	0	0	0	3,69
	2	0	0	0	3,84
	3	0	0	0	4,11
	4	0	0	0	3,94
	5	0	0	0	4,05

Таблица 3 – Матрица планирования полного факторного эксперимента

№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Значения Y <sub>1эксп.</sub> , %
1	+1	+1	+1	5,48
2	+1	+1	-1	5,84
3	+1	-1	+1	4,85
4	+1	-1	-1	3,64
5	-1	+1	+1	3,54
6	-1	+1	-1	3,89
7	-1	-1	+1	4,12
8	-1	-1	-1	4,65

Вариант 6.

Изучить влияние на параметр оптимизации  $Y$ , в качестве которого выбрана концентрация уксусной кислоты в культуральной жидкости при брожении раствора спирта, следующих факторов:

- 1) Концентрация спирта в питательной среде, % (фактор  $X_1$ );
- 2) Концентрация в питательной среде растворенного кислорода, мг/дм<sup>3</sup> (фактор  $X_2$ );
- 3) Продолжительность культивирования, час (фактор  $X_3$ );

Для изучаемых факторов  $X_1$ – $X_3$  были выбраны основные уровни и интервалы варьирования, определены верхние и нижние уровни (таблица 1).

Таблица 1 – Значения уровней факторов и интервалов варьирования в натуральных и кодированных величинах

Показатель	Фактор $X_1$		Фактор $X_2$		Фактор $X_3$	
	натуральное значение, %	кодированное значение	натуральное значение, мг/дм <sup>3</sup>	кодированное значение	натуральное значение, час	кодированное значение
Основной уровень	10,0	0	4,0	0	60	0
Интервал варьирования	5,0	–	4,0	–	20	–
Нижний уровень	5,0	–1	0,0	–1	40	–1
Верхний уровень	15,0	+1	8,0	+1	80	+1

На каждом из выбранных уровнях была проведена серия из пяти экспериментов, результаты которых представлены в таблице 2. В качестве функции отклика использовали значение концентрации уксусной кислоты в культуральной жидкости, определяемое методом ГЖХ.

Матрица планирования эксперимента и полученные экспериментальные значения представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Эксперимент для проверки воспроизводимости опытов

Серия	№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Значения Y <sub>1</sub> , %
1	1	+1	+1	+1	5,87
	2	+1	+1	+1	5,24
	3	+1	+1	+1	5,18
	4	+1	+1	+1	4,89
	5	+1	+1	+1	5,21
2	1	-1	-1	-1	2,64
	2	-1	-1	-1	2,84
	3	-1	-1	-1	2,62
	4	-1	-1	-1	2,14
	5	-1	-1	-1	2,16
3	1	0	0	0	3,69
	2	0	0	0	3,84
	3	0	0	0	4,11
	4	0	0	0	3,94
	5	0	0	0	4,05

Таблица 3 – Матрица планирования полного факторного эксперимента

№ опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Значения Y <sub>1эксп.</sub> , %
1	+1	+1	+1	5,48
2	+1	+1	-1	5,84
3	+1	-1	+1	4,85
4	+1	-1	-1	3,64
5	-1	+1	+1	3,54
6	-1	+1	-1	3,89
7	-1	-1	+1	4,12
8	-1	-1	-1	4,65

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

1. Саутин С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. / С.Н. Саутин. - Л.: Химия, 1975. – 48 с.
2. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента./ Ю.П. Адлер. - М.: Металлургия, 1969. – 157 с.
3. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий./ Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. - М.:Наука, 1971.-297 с.
4. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии./ В.В. Кафаров. -М.: Химия, 1985. – 448 с.
5. Закгейм А.Ю. Общая химическая технология: Введение в моделирование химико-технологических процессов./ А.Ю. Закгейм. - М.: Логос, 2009. – 304 с.
6. Кузичкин Н.В. Методы и средства автоматизированного расчета химико-технологических систем./ Н.В. Кузичкин, С.Н. Саутин, А.Е. Пунин. - Л: Химия, 1987. – 152 с.
7. Леонтьев В.П. Новейшая энциклопедия персонального компьютера 2009./В.П. Леонтьев. – М.: ОЛМА Медиа Групп, 2009. – 928 с.
8. Ефимова О.П. Курс компьютерной технологии./ О.П. Ефимова, В.Н. Морозов, Н.П. Угринович. – М.: Издательство АСТ; АБФ, 2005. – 432 с.
9. Кольцова Э.М. Методы синергетики в химии и химической технологии: Учебное пособие для вузов./ Э.М. Кольцова, Л.С. Гордеев. – М.: Химия, 1999. – 256 с.
10. Бояринов А.И. Методы оптимизации в химической технологии./ А.И. Бояринов, В.В. Кафаров. - М.: Химия, 1973. – 564 с.
11. Бондарь А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии (основные положения, примеры и задачи)/ А.Г. Бондарь, Г.А. Статюха. - Киев: Высшая школа. 1976г. - 184 с.
12. Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии./ И.Н. Дорохов, В.В. Кафаров. - М.: Наука, 1989. – 376 с.