

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
АПАТИТСКИЙ ФИЛИАЛ

**Методические указания к самостоятельной работе студентов**

По дисциплине: Б.1.В.03 ДВ.04.02 Моделирование химических процессов  
указывается цикл (раздел) ОП, к которому относится дисциплина, название дисциплины

для направления подготовки (специальности) 04.03.01 Химия  
код и наименование направления подготовки (специальности)

Неорганическая химия и химия координационных соединений  
наименование профиля /специализаций/образовательной программы

Квалификация выпускника, уровень подготовки бакалавр  
(указывается квалификация (степень) выпускника в соответствии с ФГОС ВО)

Кафедра - разработчик: химии и строительного материаловедения  
название кафедры - разработчика рабочей программы

Разработчик(и) А.В. Соловьев, доцент, к.т.н.  
ФИО, должность, ученая степень, (звание)

Апатиты

2019

## Пояснительная записка

**1. Методические указания** составлены на основе ФГОС ВО по направлению подготовки 04.03.01 Химия, утвержденного приказом Минобрнауки РФ от 17 июля 2017 года, № 671, учебного плана в составе ОП по направлению подготовки 04.03.01 Химия, профилю «Неорганическая химия и химия координационных соединений».

**2. Цели и задачи** учебной дисциплины (модуля). «Моделирование химических процессов»

**Целью дисциплины** (модуля) «Моделирование химических процессов» является подготовка обучающегося в соответствии с квалификационной характеристикой бакалавра и рабочим учебным планом направления 04.03.01 Химия, что предполагает освоение обучающимися теоретических знаний в области химической технологии, раскрытие взаимосвязи между химией, технологией и аппаратурным оформлением технологического процесса, формирование навыков создания аппаратурно-технологических схем.

**Задачи дисциплины** (модуля):

- изучение проблем и закономерностей перехода от лабораторных процессов и моделей к промышленным процессам и аппаратам;
- формирование практических навыков решения конкретных технических задач и умения проектировать типовые технологические схемы химико-технологических процессов.

**3. Планируемые результаты** обучения по дисциплине «Моделирование химических процессов»

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование элементов следующих компетенций в соответствии с ФГОС ВО по направлению подготовки 04.03.01 Химия:

**ПК-2-г** - Способен осуществлять контроль качества сырья, компонентов и выпускаемой продукции химического назначения, проводить паспортизацию товарной продукции

**ПК-3-г** - Способен оказывать информационную поддержку специалистам, осуществляющим научно-конструкторские работы и технологические испытания

Результаты формирования компетенций и планируемые результаты обучения представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Планируемые результаты обучения**

№ п/п	Код компетенции	Компоненты компетенции, степень их реализации	Результаты обучения
1.	<b>ПК-2-г</b> - Способен осуществлять контроль качества сырья, компонентов и выпускаемой продукции химического	Компоненты компетенции соотносятся с содержанием дисциплины и компетенция реализуется полностью	<b>Знать:</b> 1. Операционное исчисление. 2. Российскую систему патентной информации. 3. Зарубежные базы данных и поисковые системы. <b>Уметь:</b> 1. Создавать 2D, 3D и полярные графики.

	назначения, проводить паспортизацию товарной продукции		<p>2. Пользоваться греческим алфавитом как в уравнениях, так и в тексте.</p> <p><b>Владеть:</b> Инженерными приложениями и инструментами моделирования такими, как Pro/ENGINEER, Excel.</p> <p><b>Индикаторы сформированности компетенций в реализуемой части:</b>  <b>ПК-2-т-1.</b> Выполняет стандартные операции на высокотехнологическом оборудовании для характеристики сырья, промежуточной и конечной продукции химического производства  <b>ПК-2-т-2.</b> Составляет протоколы испытаний, паспорта химической продукции, отчеты о выполненной работе по заданной форме</p>
3.	<b>ПК-3-т -</b> Способен оказывать информационную поддержку специалистам, осуществляющим научно-конструкторские работы и технологические испытания	Компоненты компетенции соотносятся с содержанием дисциплины и компетенция реализуется полностью	<p><b>Знать:</b> - Mathcad и Autocad,</p> <p><b>Уметь:</b> - работать с КОМПАС-3D и <u>AutoCAD</u></p> <p><b>Владеть:</b> - навыками научно-конструкторские работы.</p> <p><b>Индикаторы сформированности компетенций в реализуемой части:</b>  <b>ПК-3-т-1.</b> Владеет навыками поиска необходимой информации в профессиональных базах данных (в т.ч., патентных)  <b>ПК-3-т-2.</b> Составляет обзор литературных источников по заданной теме, оформляет отчеты о выполненной работе по заданной форме</p>

**Таблица 2 - Тематический план**

№ раздела	Содержание самостоятельной работы	Количество часов
1	2	3
1	<b>1. Введение</b>	
2	1.1. Основные принципы моделирования химических процессов.	1

3	1.2. Иерархическая структура химических производств и их математических моделей.	1
4	<b>2. Построение эмпирических моделей</b>	
5	2.1. Формулировка задачи аппроксимации для описания экспериментальных зависимостей и получения эмпирических моделей процессов.	1
6	2.2. Нормальный закон распределения для векторных случайных величин и определение их числовых характеристик.	1
7	2.3. Линейный регрессионный анализ для построения эмпирических моделей на основе данных пассивного эксперимента.	2
8	2.4. Основные положения теории планирования экспериментов: полный факторный эксперимент (ПФЭ) и обработка его результатов.	2
9	2.5. Активный эксперимент в почти стационарной области в окрестности экстремума функции отклика.	2
10	<b>3. Математическое моделирование химико-технологических процессов.</b>	
11	3.1. Этапы математического моделирования.	3
12	3.2. Разработка математического описания процессов.	1
13	3.3. Математическое моделирование простых гидравлических систем.	1
14	3.4. Математическое моделирование теплообменников с мешалкой и змеевиковых теплообменников в стационарном состоянии.	2
15	3.5. Математическое моделирование прямоточных и противоточных трубчатых теплообменников.	1
16	3.6. Математическое моделирование стационарных процессов в реакторах с мешалкой с помощью систем конечных уравнений.	2
17	3.7. Математическое моделирование нестационарных процессов в реакторах с мешалкой с помощью систем обыкновенных дифференциальных уравнений.	1
18	3.8. Явные методы численного (приближенного) решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений различных порядков.	1
19	3.9. неявные методы численного (приближенного) решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений.	2

20	3.10. Математическое моделирование трубчатого реактора в стационарном состоянии с прямоточным движением теплоносителя и с «ясной кинетической схемой реакции».	2
21	3.11. Математическое моделирование трубчатого реактора в стационарном состоянии с противоточным движением теплоносителя и сложной кинетической схемой реакции.	2
22	3.12. Математическое моделирование нестационарных процессов с распределенными параметрами в трубчатых реакторах с помощью дифференциальных уравнений в частных производных.	1
23	3.13. Математическое моделирование процесса многокомпонентной массопередачи в ректификационных колоннах тарельчатого и насадочного типов.	1
24	3.14. Оптимизация химико-технологических процессов.	3
	<b>Итого:</b>	<b>33</b>

### Список рекомендуемой литературы

№ п\п	Название учебников, учебных пособий и других источников	Авторы (под ред.)	Издательство	Год издания
1	2	3	4	5
<b>Основная:</b>				
1.	Общая химическая технология. Введение в моделирование химико-технологических процессов: учебное пособие <a href="http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785987044971.html?SSr=010134171b106b0b2512518">http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785987044971.html?SSr=010134171b106b0b2512518</a>	Закгейм А.Ю.	М.: Логос	2017
2.	Математическое моделирование химико-технологических процессов <a href="https://e.lanbook.com/book/41014">https://e.lanbook.com/book/41014</a>	Гумеров Ас.М.,	Издательство "Лань"	2014
<b>Дополнительная:</b>				
1.	Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры <a href="http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN592210120.html?SSr=010134171b106b0b2512518">http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN592210120.html?SSr=010134171b106b0b2512518</a>	Самарский А.А.	М. : ФИЗМАТЛИТ	2005

2.	Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс. Книга 1: учебник <a href="https://e.lanbook.com/book/111193">https://e.lanbook.com/book/111193</a>	Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А., Захаренко В.В., Зиновкина Т.В., Таран А.Л., Костанян А.Е.	Издательство "Лань"	2019
3.	Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс. Книга 2: учебник <a href="https://e.lanbook.com/book/111194">https://e.lanbook.com/book/111194</a>	Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А., Захаренко В.В., Зиновкина Т.В., Таран А.Л., Костанян А.Е.	Издательство "Лань"	2019
4.	Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) : Учеб. пособие для вузов <a href="http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081826.htm?SSr=010134171b106b0b2512518">http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081826.htm?SSr=010134171b106b0b2512518</a>	Романков П.Г.	СПб. : ХИМИЗДАТ	2010

## СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

### 1. Введение.

Основные принципы моделирования химических процессов. Иерархическая структура химических производств и их математических моделей.

Вопросы для самоконтроля знаний:

1. Моделирование и модели. Внешние связи системы. Классификация входов системы.
2. Эмпирические модели. Точность моделей.
3. Стационарные и нестационарные процессы. Проектные и поверочные расчеты.
4. Особенности активного эксперимента и оптимизация экспериментов.
5. Доверительная вероятность и уровень значимости. Последовательные этапы при построении физико-химических и эмпирических моделей.
6. Прямая и обратная задачи при компьютерном моделировании на примере построения математической модели теплообменника.
7. Пассивный лабораторный эксперимент и пассивный промышленный эксперимент.

Рекомендуемая литература: основная- [1-2], дополнительная - [4].

## 2. Построение эмпирических моделей.

Формулировка задачи аппроксимации для описания экспериментальных зависимостей и получения эмпирических моделей процессов. Нормальный закон распределения для векторных случайных величин и определение их числовых характеристик. Линейный регрессионный анализ для построения эмпирических моделей на основе данных пассивного эксперимента. Основные положения теории планирования экспериментов: полный факторный эксперимент (ПФЭ) и обработка его результатов. Активный эксперимент в почти стационарной области в окрестности экстремума функции отклика.

Вопросы для самоконтроля знаний:

1. Определение коэффициентов линейных регрессионных моделей при обработке результатов пассивного эксперимента.
2. Проверка адекватности регрессионной модели с использованием критерия Фишера. Определение дисперсий воспроизводимости и адекватности, а также их чисел степеней свободы.
3. Определение числовых характеристик случайных величин вектора наблюдений (выходных) зависимых переменных  $Y$ , построение матрицы дисперсий-ковариаций вектора наблюдений. Допущения, принимаемые при регрессионном анализе.
4. Определение числовых характеристик коэффициентов регрессии для линейных моделей (для коэффициентов  $a$ ). Построение матрицы дисперсий-ковариаций для коэффициентов  $a$ .
5. Вывод формул для определения ковариаций (корреляционных моментов) для линейных и линеаризованных регрессионных моделей при обработке результатов пассивных и активных экспериментов.
6. Вывод матричной формулы для определения коэффициентов линейных и линеаризованных регрессионных моделей при обработке результатов пассивных и активных экспериментов. Чем отличается применение выведенной формулы для линейных и линеаризованных моделей: привести примеры для линейной и линеаризованной модели?
7. Нормальное распределение вектора наблюдений выходной (зависимой) переменной процесса при обработке результатов пассивных и активных экспериментов.
8. Оценки дисперсий – остаточной, воспроизводимости и адекватности при обработке результатов пассивных экспериментов при различном числе параллельных опытов. Коэффициент корреляции и его оценка для двух случайных величин. Графическое представление поля корреляции.

Рекомендуемая литература: основная [2], дополнительная [1-4].

## 3. Математическое моделирование химико-технологических процессов.

Этапы математического моделирования. Разработка математического описания процессов. Математическое моделирование простых гидравлических систем.

Математическое моделирование теплообменников с мешалкой и змеевиковых теплообменников в стационарном состоянии. Математическое моделирование прямоточных и противоточных трубчатых теплообменников.

Математическое моделирование стационарных процессов в реакторах с мешалкой с помощью систем конечных уравнений.

Математическое моделирование нестационарных процессов в реакторах с мешалкой с помощью систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Явные методы численного (приближенного) решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений различных порядков. неявные методы численного (приближенного) решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Математическое моделирование трубчатого реактора в стационарном состоянии с прямоточным движением теплоносителя и с «ясной кинетической схемой реакции».

Математическое моделирование трубчатого реактора в стационарном состоянии с противоточным движением теплоносителя и сложной кинетической схемой реакции.

Математическое моделирование нестационарных процессов с распределенными параметрами в трубчатых реакторах с помощью дифференциальных уравнений в частных производных.

Математическое моделирование процесса многокомпонентной массопередачи в ректификационных колоннах тарельчатого и насадочного типов.

Оптимизация химико-технологических процессов

#### **Вопросы для самоконтроля знаний:**

1. Определение числовых характеристик случайных величин вектора наблюдений (выходных) зависимых переменных  $Y$ , построение матрицы дисперсий-ковариаций вектора наблюдений. Допущения, принимаемые при регрессионном анализе.
2. Определение числовых характеристик коэффициентов регрессии для линейных моделей (для коэффициентов  $a$ ).
3. Нормальное распределение вектора наблюдений выходной (зависимой) переменной процесса при обработке результатов пассивных и активных экспериментов.
4. Числовые характеристики нормально-распределенных случайных величин: математическое ожидание, дисперсия и среднеквадратичное отклонение (стандарт). Теоретическое и эмпирическое уравнения регрессии.
5. Оценки дисперсий – остаточной, воспроизводимости и адекватности при обработке результатов пассивных экспериментов при различном числе параллельных опытов.
6. Коэффициент корреляции и его оценка для двух случайных величин. Графическое представление поля корреляции.
7. Особенности активного эксперимента и оптимизация экспериментов. Отличие активного эксперимента от пассивного эксперимента.

8. Определение значимости коэффициентов регрессии при обработке результатов ПФЭ с применением  $t$ -распределения Стьюдента и процедура исключения незначимых коэффициентов.
9. Оптимальные свойства матрицы планирования при проведении экспериментов ОЦКП и за счет чего можно обеспечить свойство ортогональности матрицы планирования в этом случае?
10. Вывод формул для определения дисперсий и ковариаций для моделей при обработке результатов ортогонального центрального композиционного плана эксперимента – ОЦКП.
11. Экспериментально-статистический метод Бокса-Вильсона для оптимизации экспериментов. Блок-схема алгоритма метода Бокса-Вильсона. Определение оптимального значения функции отклика и условие завершения экспериментов.
12. Вывести матричную формулу для определения коэффициентов регрессии  $A$ ,  $E$  для уравнения Аррениуса, связывающего константу скорости реакции ( $k$ ) с температурой ( $T$ ).

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ**

Программой дисциплины предполагается проведение двух контрольных работ. Студентам предлагается ответить на следующие вопросы:

### Контрольная работа №1

- Построение математических моделей стационарных режимов работы аппаратов:
- построить математическое описание стационарного режима процесса в гомогенном жидкофазном реакторе с мешалкой и внешней рубашкой (движение потока теплоносителя в рубашке может быть представлено моделью идеального смешения) и информационную матрицу для решения системы уравнений математического описания. Кинетическая схема реакции:  $2A \rightarrow B$ ,  $3A \rightarrow D$ ;
  - построить математическое описание стационарного режима процесса в гомогенном жидкофазном адиабатическом реакторе идеального смешения и информационную матрицу для решения системы уравнений математического описания. Кинетическая схема реакции:  $A \leftrightarrow 2B$ ,  $B \leftrightarrow C$ .

### Контрольная работа №2

Построение математических моделей нестационарных процессов с распределенными параметрами в трубчатых реакторах

- Построить математическое описание нестационарного режима процесса в гомогенном жидкофазном политропическом реакторе идеального смешения и информационную матрицу для решения системы уравнений математического описания. Кинетическая схема реакции:  $A+B \rightarrow C, A+C \rightarrow D$ ;
- построить математическое описание нестационарного режима процесса в гомогенном жидкофазном политропическом реакторе идеального смешения и информационную матрицу для решения системы уравнений математического описания. Кинетическая схема реакции:  $A+B \leftrightarrow C+2D$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Итоговый уровень знаний студентов, приобретенный студентами при изучении дисциплины «Моделирование химических процессов», проверяется на зачете.

Для проверки теоретической подготовки студентов по дисциплине на зачет выносятся следующие вопросы:

1. Определение коэффициентов линейных регрессионных моделей при обработке результатов пассивного эксперимента. Вывод матричных формул для определения коэффициентов регрессии.
2. Проверка адекватности регрессионной модели с использованием критерия Фишера. Определение дисперсий воспроизводимости и адекватности, а также их чисел степеней свободы.
3. Доверительная вероятность и уровень значимости. Последовательные этапы при построении физико-химических и эмпирических моделей.
4. Прямая и обратная задачи при компьютерном моделировании на примере построения математической модели теплообменника. Пассивный лабораторный эксперимент и пассивный промышленный эксперимент.
5. Определение числовых характеристик случайных величин вектора наблюдений (выходных) зависимых переменных  $Y$ , построение матрицы дисперсий-ковариаций вектора наблюдений. Допущения, принимаемые при регрессионном анализе.
6. Определение числовых характеристик коэффициентов регрессии для линейных моделей (для коэффициентов  $a$ ). Построение матрицы дисперсий-ковариаций для коэффициентов  $a$ . Вывод формул для определения ковариаций (корреляционных моментов) для линейных и линеаризованных регрессионных моделей при обработке результатов пассивных и активных экспериментов.
7. Вывод матричной формулы для определения коэффициентов линейных и линеаризованных регрессионных моделей при обработке результатов пассивных и активных экспериментов. Чем отличается применение выведенной формулы для линейных и линеаризованных моделей: привести примеры для линейной и линеаризованной модели?

8. Нормальное распределение вектора наблюдений выходной (зависимой) переменной процесса при обработке результатов пассивных и активных экспериментов. Числовые характеристики нормально-распределенных случайных величин: математическое ожидание, дисперсия и среднеквадратичное отклонение (стандарт). Теоретическое и эмпирическое уравнения регрессии.
9. Оценки дисперсий – остаточной, воспроизводимости и адекватности при обработке результатов пассивных экспериментов при различном числе параллельных опытов. Коэффициент корреляции и его оценка для двух случайных величин. Графическое представление поля корреляции.
10. Определение значимости коэффициентов регрессии при обработке результатов пассивных экспериментов с применением t-распределения Стьюдента и процедура исключения незначимых коэффициентов. Понятие адекватности регрессионных моделей – качественное и количественное. Критерии количественной оценки адекватности моделей, в том числе с применением F-распределения Фишера.
11. Особенности активного эксперимента и оптимизация экспериментов. Отличие активного эксперимента от пассивного эксперимента. Понятия функции отклика и факторов Полный факторный эксперимент (ПФЭ), формулы кодирования факторов и графическое представление опытов в факторном пространстве. Уравнения регрессии для 2-х и 3-х факторов с двойным (бинарным) взаимодействием факторов. Построить матрицу планирования экспериментов для 2-х и 3-х факторов. Оптимальные свойства матрицы планирования ПФЭ – симметричности, ортогональности и нормировки. Вывод формул для определения коэффициентов регрессионных моделей при обработке результатов полного факторного эксперимента – ПФЭ типа  $2^m$  ( $m$  – число факторов).
12. Определение значимости коэффициентов регрессии при обработке результатов ПФЭ с применением t-распределения Стьюдента и процедура исключения незначимых коэффициентов. Понятие адекватности регрессионных моделей – количественная оценка адекватности моделей с применением F-распределения Фишера.
13. Свойство ротатабельности моделей, полученных в результате обработки результатов ПФЭ типа  $2^m$  ( $m$  – число факторов), и определение направления градиента в факторном пространстве, с учетом которого следует выбирать новую область для проведения серии опытов ПФЭ. Статистический критерий близости оптимального значения функции отклика.
14. Понятие «почти стационарной области» в факторном пространстве. Уравнение регрессии, описывающей эту область для двух факторов с учетом взаимодействия факторов. Общее число опытов для определения

коэффициентов этого уравнения. Опыты в звездных точках факторного пространства и в центре плана. Построить ортогональный центральный композиционный план эксперимента – ОЦКП и дать графическую интерпретацию расположения опытов в факторном пространстве. Приведите формулы кодирования факторов. Оптимальные свойства матрицы планирования при проведении экспериментов ОЦКП и за счет чего можно обеспечить свойство ортогональности матрицы планирования в этом случае?

15. Вывод формул для определения величины звездного плеча и коэффициента  $S$ , обеспечивающих ортогональность матрицы планирования при обработке результатов ортогонального центрального композиционного плана эксперимента – ОЦКП.
16. Вывод формул для определения дисперсий и ковариаций для моделей при обработке результатов ортогонального центрального композиционного плана эксперимента – ОЦКП.
17. Вывод формул для определения коэффициентов регрессионных моделей с бинарным взаимодействием факторов при обработке результатов ОЦКП. Постройте соответствующую матрицу планирования ОЦКП эксперимента для 2 факторов. Как определяется экстремум функции отклика в этом случае?
18. Оценка незначимости коэффициентов регрессии при обработке результатов ортогонального центрального композиционного плана эксперимента – ОЦКП. Как исключаются один и несколько незначимых коэффициентов регрессии при обработке результатов активного эксперимента? По результатам каких экспериментов определяются дисперсии адекватности и воспроизводимости для определения адекватности модели в этом случае?
19. Экспериментально-статистический метод Бокса-Вильсона для оптимизации экспериментов. Блок-схема алгоритма метода Бокса-Вильсона. Определение оптимального значения функции отклика и условие завершения экспериментов.
20. Вывести матричную формулу для определения коэффициентов регрессии  $k$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  для уравнения, связывающего абсолютную вязкость ( $\eta$ ) с плотностью ( $\rho$ ) и температурой ( $T$ ) с помощью функции:  $3 k \exp(a b c) T T h = r + +$  Построить таблицу пассивного эксперимента. При обработке результатов пассивного эксперимента линейаризовать регрессионную модель и реализовать аналитический и алгоритмический подходы для получения решения.
21. Вывести матричную формулу для определения коэффициентов регрессии  $A$ ,  $E$  для уравнения Аррениуса, связывающего константу скорости реакции ( $k$ ) с температурой ( $T$ ) с помощью функции: Построить таблицу пассивного эксперимента. При обработке результатов пассивного эксперимента линейаризовать регрессионную модель, и реализовать аналитический и алгоритмический подходы для получения решения.

22. Вывести матричную формулу для определения коэффициентов регрессии ( $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ) для уравнения, связывающего выходную переменную ( $y$ ) с факторами ( $x_1$  и  $x_2$ ) с помощью функции. Построить таблицу пассивного эксперимента. При обработке результатов пассивного эксперимента линеаризовать регрессионную модель, и реализовать аналитический и алгоритмический подходы для получения решения.
23. Вывести матричную формулу для определения коэффициентов регрессии ( $\alpha$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ) для уравнения, связывающего выходную переменную ( $y$ ) с факторами ( $x_1$  и  $x_2$ ) с помощью функции. Построить таблицу пассивного эксперимента. При обработке результатов пассивного эксперимента линеаризовать регрессионную модель, и реализовать аналитический и алгоритмический подходы для получения решения.
24. Вывести матричную формулу для определения коэффициентов регрессии ( $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ) для уравнения, связывающего выходную переменную ( $y$ ) с фактором ( $x$ ) с помощью функции. Построить таблицу пассивного эксперимента. При обработке результатов пассивного эксперимента линеаризовать регрессионную модель, и реализовать аналитический и алгоритмический подходы для получения решения.
25. Вывести матричную формулу для определения коэффициентов регрессии  $A$  и  $B$  в уравнении Киреева, связывающего давление насыщенного пара индивидуального вещества ( $P$ ) с температурой ( $T$ ) с помощью функции:  $P = A + B \cdot T$ . Построить таблицу пассивного эксперимента. При обработке результатов пассивного эксперимента линеаризовать регрессионную модель, и реализовать аналитический и алгоритмический подходы для получения решения.
26. Вывести матричную формулу для определения коэффициентов регрессии  $A$ ,  $B$  и  $C$  в уравнении Антуана, связывающего давление насыщенного пара индивидуального вещества ( $P$ ) с температурой ( $T$ ) с помощью функции  $\ln P = A - \frac{B}{T} + C \ln T$ . Построить таблицу пассивного эксперимента. При обработке результатов пассивного эксперимента линеаризовать регрессионную модель, и реализовать аналитический и алгоритмический подходы для получения решения.
27. Вывести матричную формулу для определения коэффициентов регрессии  $A$ ,  $B$  и  $C$  в уравнении Кирхгофа, связывающего давление насыщенного пара индивидуального вещества ( $P$ ) с температурой ( $T$ ) с помощью функции:  $\ln P = A - \frac{B}{T} + C \ln T$ . Построить таблицу пассивного эксперимента. При обработке результатов пассивного эксперимента линеаризовать регрессионную модель, и реализовать аналитический и алгоритмический подходы для получения решения.
28. Пассивный лабораторный эксперимент и пассивный промышленный эксперимент. Построить таблицу пассивного эксперимента для построения эмпирической математической модели. Дать определение регрессионной модели. Линейная и нелинейная регрессия. Условия применимости

регрессионного анализа и этапы регрессионного анализа. Структурная и параметрическая идентификация регрессионных моделей. Вывод матричной формулы для определения коэффициентов линейных и линеаризованных регрессионных моделей при обработке результатов пассивного эксперимента. Чем отличается применение выведенной формулы для линейных и линеаризованных моделей: привести примеры для линейной и линеаризованной модели?

29. Нормальное распределение вектора наблюдений выходной (зависимой) переменной процесса при обработке результатов пассивных экспериментов. Числовые характеристики нормально-распределенных случайных величин: математическое ожидание, дисперсия и средне-квадратичное отклонение (стандарт). Вывод формул для определения дисперсий и ковариаций (корреляционных моментов) для линейных и линеаризованных регрессионных моделей при обработке результатов пассивных экспериментов.
30. Построить математическое описание стационарного режима процесса в гомогенном жидкофазном реакторе с мешалкой и внешней рубашкой (движение потока теплоносителя в рубашке может быть представлено моделью идеального смешения) и информационную матрицу для решения системы уравнений математического описания. Кинетическая схема реакции:  $2A \rightarrow B$ ,  $3A \rightarrow D$
31. Построить математическое описание стационарного режима процесса в гомогенном жидкофазном реакторе с мешалкой и внешней рубашкой (движение потока теплоносителя в рубашке может быть представлено моделью идеального вытеснения) и информационную матрицу для решения системы уравнений математического описания. Кинетическая схема реакции:  $2A \rightarrow B \rightarrow 2C$
32. Построить математическое описание стационарного режима процесса в гомогенном жидкофазном реакторе с мешалкой и внешней рубашкой (движение потока теплоносителя в рубашке может быть представлено моделью идеального вытеснения) и информационную матрицу для решения системы уравнений математического описания. Кинетическая схема реакции:  $A \leftrightarrow B + C$
33. Построить математическое описание стационарного режима процесса в гомогенном жидкофазном реакторе с мешалкой и (движение потока теплоносителя в рубашке может быть представлено моделью идеального вытеснения) и информационную матрицу для решения системы уравнений математического описания. Кинетическая схема реакции:  $3A \rightarrow B$ ,  $2C \rightarrow B$ .
34. Построить математическое описание стационарного режима процесса в гомогенном жидкофазном адиабатическом реакторе идеального смешения и информационную матрицу для решения системы уравнений математического описания. Кинетическая схема реакции:  $A \leftrightarrow B$ ,  $B \leftrightarrow C$

35. Построить математическое описание стационарного режима процесса в гомогенном жидкофазном адиабатическом реакторе идеального смешения и информационную матрицу для решения системы уравнений математического описания. Кинетическая схема реакции:  $A \leftrightarrow 2B, B \leftrightarrow C$
36. Построить математическое описание стационарного режима процесса в гомогенном жидкофазном политропическом реакторе идеального смешения и информационную матрицу для решения системы уравнений математического описания. Кинетическая схема реакции:  $A+B \rightarrow C, A+C \rightarrow D$
37. Построить математическое описание стационарного режима процесса в гомогенном жидкофазном политропическом реакторе идеального смешения и информационную матрицу для решения системы уравнений математического описания. Кинетическая схема реакции:  $A+B \leftrightarrow C+2D$
38. Построить математическое описание стационарного режима процесса в гомогенном жидкофазном политропическом реакторе идеального смешения и информационную матрицу для решения системы уравнений математического описания. Кинетическая схема реакции:  $2A \leftrightarrow B, B+A \rightarrow C$
39. Построить математическое описание стационарного режима процесса в гомогенном жидкофазном политропическом реакторе идеального вытеснения и информационную матрицу для решения системы уравнений математического описания. Кинетическая схема реакции:  $2A \rightarrow B \rightarrow 2C$ .
40. Построить математическое описание стационарного режима процесса в гомогенном жидкофазном реакторе с мешалкой и внешней рубашкой (движение потока теплоносителя в рубашке может быть представлено моделью идеального смешения) и информационную матрицу для решения системы уравнений математического описания. Кинетическая схема реакции:  $2A \rightarrow B \rightarrow 2$