

**А. И. Смирнова
Е. Ю. Демьянцева
И. И. Осовская**

**ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКИ
(НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА)
МАГИСТРОВ НА КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ
И КОЛЛОИДНОЙ ХИМИИ**

Учебно-методическое пособие

**Санкт-Петербург
2024**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики**

**А. И. Смирнова
Е. Ю. Демьянцева
И. И. Осовская**

**ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКИ
(НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА)
МАГИСТРОВ НА КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ
И КОЛЛОИДНОЙ ХИМИИ**

Учебно-методическое пособие

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2024

УДК 541.1 (07)
ББК 24.5я7
С 506

Рецензенты:

доктор химических наук, доцент, главный научный сотрудник
Института высокомолекулярных соединений РАН

А. В. Теньковцев;

доктор химических наук, доцент, профессор Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна

А. Б. Дягилева

Смирнова, А. И.

С 506 Организация производственной практики (научно-исследовательская работа) магистров на кафедре физической и коллоидной химии: учебно-методическое пособие / А. И. Смирнова, Е. Ю. Демьянцева, И. И. Осовская. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. — 82 с.

Учебно-методическое пособие соответствует программе и учебному плану учебной практики (научно-исследовательской работы) для студентов, обучающихся по направлению подготовки 18.04.01 «Химическая технология», профиль «Химическая технология высокомолекулярных соединений».

В учебно-методическом пособии представлен порядок прохождения практики, типы заданий, требования к содержанию и оформлению отчета по ней.

УДК 541.1 (07)
ББК 24.5я7

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2024
© Смирнова А. И., Демьянцева Е. Ю.,
Осовская И. И., 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИКИ.....	5
2. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В АНАЛИТИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЯХ (ПНД Ф 12.13.1-03).....	7
2.1. Общие положения	7
2.2. Средства индивидуальной защиты.....	7
2.3. Правила пожарной безопасности в лаборатории.....	8
2.4. Правила электробезопасности в лаборатории.....	9
3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКИ (НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА)	10
3.1. Задачи практики	10
3.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате прохождения практики	11
3.3. Содержание практики.....	12
4. СТРУКТУРА И ЭТАПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ	14
5. ОПИСАНИЕ ЭТАПОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ.....	16
5.1. Подготовительный этап.....	16
5.2. Этап постановки проблемы.....	17
5.3. Этап выдвижения гипотезы	19
5.4. Этапы теоретического и практического исследования.....	20
5.5. Этап анализа проделанной работы, основные выводы и рекомендации	24
5.6. Этап освоения.....	25
6. МЕТОДЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА	26
6.1. Основные термины и понятия планированного эксперимента.....	26
6.2. Планы первого порядка	30
6.3. Планы второго порядка	48
7. ФОРМЫ ОТЧЕТНОСТИ ПО ПРАКТИКЕ	64
8. ФОРМЫ, ПОРЯДОК АТТЕСТАЦИИ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПО ПРАКТИКЕ	66
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	68
ПРИЛОЖЕНИЯ	69

ВВЕДЕНИЕ

Основная образовательная программа магистратуры, реализуемая Высшей школой технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного технологического университета промышленных технологий и дизайна по направлению подготовки 18.04.01 «Химическая технология» по профилю подготовки «Химическая технология высокомолекулярных соединений», представляет собой систему документов, разработанную и утвержденную высшим учебным заведением на основе федерального государственного образовательного стандарта по соответствующему направлению подготовки высшего образования (ФГОСВО), а также с учетом рекомендованной примерной образовательной программы.

Образовательная программа регламентирует цели, ожидаемые результаты, содержание, условия и технологии реализации образовательного процесса, оценку качества подготовки выпускника по данному направлению подготовки и включает в себя: учебный план, рабочие программы учебных курсов, предметов, дисциплин (модулей) и другие материалы, обеспечивающие качество подготовки обучающихся, а также программы учебной и производственной практики, календарный учебный график и методические материалы, обеспечивающие реализацию соответствующей образовательной технологии.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИКИ

Практика является обязательным разделом основной образовательной программы (ООП) магистратуры. Она представляет собой вид учебных занятий, непосредственно ориентированных на профессионально-практическую подготовку обучающихся. Организацию проведения практик берет на себя выпускающая кафедра, которая вносит проект приказа для прохождения всех видов практик.

Учебным планом Института технологии Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна для бакалавров направления 18.04.01 «Химическая технология» профиля «Химическая технология высокомолекулярных соединений» очной формы обучения предусмотрены следующие виды практик:

- учебная (ознакомительная) практика;
- учебная практика, научно-исследовательская работа (получение первичных навыков научно-исследовательской работы);
- производственная практика, научно-исследовательская работа;
- производственная практика, преддипломная практика;

Практика проводится в Высшей школе технологии и энергетики на кафедре физической и коллоидной химии с использованием материально-технической базы кафедры или на базе сторонних организаций. Практика обучающихся предусматривает аналитическую работу обучающихся с имеющейся технической документацией, ознакомление обучающихся с тематикой научных исследований выпускающей кафедры, с оборудованием кафедральных лабораторий, вузовских и научно-исследовательских организаций, ознакомление с учебным процессом кафедры; выполнение работ, связанных с подготовкой учебной лаборатории кафедры к новому учебному году, знакомство со структурой предприятий различного профиля, изучения основ технологических процессов.

Практика может проводиться также в сторонних организациях, профиль которых соответствует направлению подготовки, а также на базе организаций и предприятий химико-технологической отрасли. При направлении магистров во внешние организации на них в установленном порядке оформляются направления.

Направление студентов на любой вид практики оформляется приказом по университету. Непосредственными участниками организации проведения любого вида практики являются сам студент, руководитель практики от университета (преподаватель), принимающая организация (руководитель данного подразделения) и специалист, который будет непосредственно руководить практикой (руководитель и специалист могут быть в одном лице).

Обучающиеся, заключившие контракт с будущими работодателями или

совмещающие обучение с трудовой деятельностью на предприятиях или организациях, вправе проходить в этих организациях практику в случае, если профессиональная деятельность, осуществляемая ими в указанных предприятиях или организациях, соответствует целям практики. Допускается прохождение отдельными обучающимися практики по месту жительства, месту работы родителей, месту предполагаемого трудоустройства по согласованию с заведующим кафедрой при условии соответствия базы практики требованиям, обеспечивающим выполнение ФГОС в полном объеме.

Практики осуществляются на основе договоров между Университетом и профильными организациями, в соответствии с которыми указанные организации независимо от их организационно-правовых форм предоставляют места для прохождения практики обучающимся в Университете. Договоры заключаются в двух экземплярах и хранятся в профильной организации в отделе практической подготовки студентов.

Для руководства практикой, проводимой в Университете, назначается руководитель (руководители) практики от Университета из числа лиц, относящихся к профессорско-преподавательскому составу Университета. Для руководства практикой, проводимой в профильной организации, назначаются руководитель (руководители) практики из числа лиц, относящихся к профессорско-преподавательскому составу Университета, организующей проведение практики, и руководитель (руководители) практики из числа работников профильной организации.

Перед началом практики руководитель практики организует и проводит общее собрание студентов. Целью данного собрания является:

- знакомство студентов со своим непосредственным преподавателем – руководителем практики;
- получение студентами направлений на прохождение практики и необходимых материалов (индивидуальное задание, сведения по практике, титульный лист отчета).

По окончании практики обучающийся представляет руководителю отчет. Результаты практики оцениваются по защите обучающимся отчета по выполнению индивидуального задания с учетом отзыва руководителя.

Отчет по практике обучающийся защищает публично перед комиссией по приему защиты практики. Обучающиеся, не выполнившие программу практики по уважительной причине, направляются на практику повторно в свободное от учебы время. Обучающиеся, не выполнившие программу практики без уважительной причины или получившие отрицательную оценку, могут быть отчислены из учебного заведения как имеющие академическую задолженность.

2. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В АНАЛИТИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЯХ (ПНД Ф 12.13.1-03)

2.1. Общие положения

- 1.1. К работе в лаборатории студенты допускаются только после прохождения вводного инструктажа о соблюдении мер безопасности, инструктажа на рабочем месте по пожарной безопасности.
- 1.2. Прохождение инструктажа обязательно для всех принимаемых на работу, независимо от их образования, стажа работы и должности, а также для проходящих практику или производственное обучение.
- 1.3. Проведение всех видов инструктажа регистрируется в журнале (Приложение 3, 4, 5).
- 1.4. Распоряжением по лаборатории в каждом рабочем помещении назначаются ответственные за соблюдение правил техники безопасности, правильное хранение легковоспламеняющихся, взрывоопасных и ядовитых веществ, санитарное состояние помещений, обеспеченность средствами индивидуальной защиты и аптечками первой помощи с необходимым набором медикаментов.
- 1.5. Проведение вводного инструктажа, контроль выполнения правил техники безопасности во всей лаборатории и ведение журнала инструктажа осуществляет назначенное начальником лаборатории должностное лицо, в подчинении которого находятся ответственные рабочих помещений.

2.2. Средства индивидуальной защиты

- 1.1. При работе в химической лаборатории необходимо надевать халат из хлопчатобумажной ткани.
- 1.2. При выполнении работ, связанных с выделением ядовитых газов и пыли, для защиты органов дыхания следует применять респираторы или противогазы и другие средства защиты.
- 1.3. При работе с едкими и ядовитыми веществами дополнительно применяют фартуки, средства индивидуальной защиты глаз и рук.
- 1.4. Для защиты рук от действия кислот, щелочей, солей, растворителей применяют резиновые перчатки. На перчатках не должно быть порезов, проколов и других повреждений. Надевая перчатки, следует посыпать их изнутри тальком.
- 1.5. Для защиты глаз применяют очки различных типов, щитки, маски.

2.3. Правила пожарной безопасности в лаборатории

Все помещения лаборатории должны соответствовать требованиям пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004-91 и иметь средства пожаротушения по ГОСТ 12.4.009-83.

- 1.1. Лаборатория должна быть оснащена пожарными кранами (не менее одного на этаж) с пожарными рукавами. В каждом рабочем помещении должны быть в наличии огнетушители и песок, а в помещениях с огнеопасными и легковоспламеняющимися веществами – дополнительные средства пожаротушения.
- 1.2. В помещении лаборатории на видном месте должен быть вывешен план эвакуации сотрудников в случае возникновения пожара.
- 1.3. Распоряжением по лаборатории из числа сотрудников назначается группа (3-5 человек), которая организует все противопожарные мероприятия, получив инструктаж местной пожарной команды.
- 1.4. Все сотрудники лаборатории должны быть обучены правилам обращения с огне- и взрывоопасными веществами, газовыми приборами, а также должны уметь обращаться с противопогазом, огнетушителем и другими средствами пожаротушения, имеющимися в лаборатории.
- 1.5. В помещениях лаборатории и в непосредственной близости от них (в коридорах, под лестницами) запрещается хранить горючие материалы и устанавливать предметы, загромождающие проходы и доступ к средствам пожаротушения.
- 1.6. Курить в помещениях лаборатории строго запрещается!
- 1.7. Без разрешения начальника лаборатории и лица, ответственного за противопожарные мероприятия, запрещается установка лабораторных и нагревательных приборов, пуск их в эксплуатацию, переделка электропроводки.
- 1.8. Все нагревательные приборы должны быть установлены на термоизолирующих подставках.
- 1.9. Запрещается эксплуатация неисправных лабораторных и нагревательных приборов.
- 1.10. После окончания работы необходимо отключить электроэнергию, газ и воду во всех помещениях.
- 1.11. Каждый сотрудник лаборатории, заметивший огонь, задымление или другие признаки пожара обязан:
 - немедленно вызвать пожарную часть по телефону;
 - принять меры по ограничению распространения огня и ликвидации пожара;
 - поставить в известность начальника лаборатории, который в свою очередь, должен известить сотрудников, принять меры к их эвакуации и ликвидации пожара.

2.4. Правила электробезопасности в лаборатории

Все помещения лаборатории должны соответствовать требованиям электробезопасности при работе с электроустановками по ГОСТ 12.1.019-79.

- 1.1. Все электрооборудование с напряжением свыше 36 В, а также оборудование и механизмы, которые могут оказаться под напряжением, должны быть надежно заземлены.
- 1.2. Для отключения электросетей на вводах должны быть рубильники или другие доступные устройства. Отключение всей сети, за исключением дежурного освещения, производится общим рубильником.
- 1.3. В целях предотвращения электротравматизма запрещается:
 - работать на неисправных электрических приборах и установках;
 - перегружать электросеть;
 - переносить и оставлять без надзора включенные электроприборы;
 - работать вблизи открытых частей электроустановок, прикасаться к ним;
 - загромождать подходы к электрическим устройствам.
- 1.4. О всех обнаруженных дефектах в изоляции проводов, неисправности рубильников, штепсельных вилок, розеток, а также заземления и ограждений следует немедленно сообщить электрику. В случае перерыва в подаче электроэнергии электроприборы должны быть немедленно выключены.
- 1.5. Запрещается использование в пределах одного рабочего места электроприборов класса «0» и заземленного электрооборудования.
- 1.6. Категорически запрещается прикасаться к корпусу поврежденного прибора или токоведущим частям с нарушенной изоляцией и одновременно к заземленному оборудованию (другой прибор с исправным заземлением, водопроводные трубы, отопительные батареи), либо прикасаться к поврежденному прибору, стоя на влажном полу.
- 1.7. При поражении электрическим током необходимо как можно быстрее освободить пострадавшего от действия электрического тока, отключив электроприбор, которого касается пострадавший. Отключение производится с помощью отключателя или рубильника.
- 1.8. При невозможности быстрого отключения электроприбора необходимо освободить пострадавшего от токоведущих частей деревянным или другим не проводящим ток предметом.
- 1.9. Во всех случаях поражения электрическим током необходимо вызвать врача.

3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКИ (НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА)

3.1. Задачи практики

Производственная практика (научно-исследовательская работа) для очной формы обучения в соответствии с учебным планом проводится на 1 и 2 курсе магистратуры.

Вид промежуточной аттестации – зачет с оценкой.

Цель (преддипломной) практики – закрепление, расширение и углубление полученных знаний при выполнении выпускной квалификационной работы.

Цель производственной практики (научно-исследовательская работа) – расширение профессионального кругозора, систематизация, углубление и закрепление теоретических знаний и практических умений и навыков в сфере профессиональной деятельности по направлению подготовки «Химическая технология», направленность (профиль) подготовки «Химическая технология высокомолекулярных соединений», формирование навыков самостоятельной исследовательской деятельности, сбор материала для выполнения научно-исследовательской работы студента и для написания выпускной работы магистра.

Задачи практики:

- приобретение практического опыта, необходимого для выполнения экспериментальной части ВКР;
- приобретение навыков самостоятельного планирования и выполнения научного исследования;
- поиск, систематизация и обобщение отечественной и зарубежной литературы для грамотной постановки цели, актуальности и научной новизны ВКР;
- проведение экспериментальных исследований по заданной тематике.

Задачи, решаемые в ходе прохождения практики по семестрам:

2 семестр – выбор и обоснование темы научного исследования;

- составление программы, рабочего плана и графика выполнения научного исследования;
- постановка целей и конкретных задач, формулировка рабочей гипотезы, обобщение и критический анализ трудов отечественных и зарубежных специалистов по теме научного исследования;
- сбор, обработка, анализ и систематизация информации по теме исследования.

3 семестр – разработка методики проведения научных исследований и организации их выполнения;

- разработка математической модели исследуемого объекта;
- разработка методов и инструментов проведения исследований и анализа их результатов;
- описание объекта и предмета научного исследования.

4 семестр – анализ отечественных и зарубежных источников по заданной тематике;

- представление результатов НИР (отчет, публикации, выступления).

Способы проведения практики – стационарная.

Форма проведения – концентрированная.

3.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате прохождения практики

ПК-1: Способен разрабатывать технико-экономические проекты организации по внедрению инновационных полимерных материалов.

Знать: технологию и технические требования, предъявляемые к готовой продукции предприятий химической технологии высокомолекулярных соединений.

Уметь: анализировать физико-химические свойства полученного полимерного материала и составлять рекомендации по его внедрению.

Владеть: навыками разработки рекомендаций по повышению конкурентоспособности полученного полимерного материала.

ПК-2: Способен осуществлять руководство исследованиями качества сырья и готовой продукции.

Знать: методики проведения испытаний полученного полимерного материала.

Уметь: анализировать экологические последствия получения изучаемого полимерного материала.

Владеть: навыками испытаний качества готового полимерного материала.

ПК-3: Способен осуществлять корректировку технологических процессов и режимов производства полимерных материалов.

Знать: технические требования, предъявляемые к высокомолекулярным соединениям, для получения полимерных материалов с улучшенными свойствами.

Уметь: модернизировать процессы получения полимерных материалов с учетом заданных требований и экологической чистоты.

Владеть: навыками анализа выходных параметров пробных партий для разработки предложений по оптимизации технологического процесса получения высокомолекулярных соединений.

ПК-4: Способен выполнять прикладные экспериментальные работы по созданию новых полимерных материалов.

Знать: технологию производства изучаемого полимерного материала.

Уметь: проводить испытания эксплуатационных характеристик полученного полимерного материала.

Владеть: навыками выбора образцов-прототипов полученного полимерного материала.

ПК-5: Способен разрабатывать новые методы лабораторных испытаний полимерных материалов.

Знать: методы анализа основных свойств и характеристик изучаемого полимерного материала.

Уметь: организовывать научные исследования изучаемого полимерного материала.

Владеть: навыками апробации новых и существующих методик анализа свойств изучаемого полимерного материала.

ПК-6: Способен разрабатывать предложения по получению новых полимерных материалов.

Знать: методы анализа технологических и потребительских характеристик полученного полимерного материала.

Уметь: разрабатывать предложения по улучшению технологических и потребительских свойств полученного полимерного материала.

Владеть: навыками систематизации полученных данных о технологических и потребительских свойствах изучаемого полимерного материала.

ПК-7: Способен осуществлять систематический сбор и обработку информации о состоянии технологических процессов производства полимерных материалов.

Знать: способы оптимизации производства высокомолекулярных соединений с заданными характеристиками.

Уметь: оптимизировать процесс получения полимерного материала с учетом современных направлений развития химического синтеза.

Владеть: навыками составления плана оптимизации процесса получения полимерных материалов с учетом передового опыта.

3.3. Содержание практики

Производственная практика (научно-исследовательская работа) осуществляется на кафедре «Физической и коллоидной химии», в лабораториях кафедры, в научной библиотеке ВШТЭ с использованием электронных информационных ресурсов, а также в сторонних организациях, обладающих необходимым кадровым и научно-техническим потенциалом.

Содержание научно-исследовательской практики студента-магистранта в каждом семестре указывается в индивидуальном плане работы студента. План научно-исследовательской практики разрабатывается научным руководителем магистранта и фиксируется по каждому семестру в отчете по научно-исследовательской практике. Научно-исследовательской практикой руководит руководитель магистерской диссертации.

Научно-исследовательская практика включает следующие этапы:

1. Подготовительный этап. Ознакомление с целью, программой, порядком прохождения практики НИР, методической и отчетной документацией. Получение индивидуального задания от руководителя практики (в 2, 3, 4 семестре).

2. Основной этап. Получение профессиональных умений и навыков в соответствии с индивидуальным заданием:

- в 1 семестре – изучение тематической научной, нормативной, методической и производственной литературы, сбор и анализ необходимой информации по теме магистерской диссертации. Освещаются следующие вопросы: актуальность темы, цель диссертационной работы, общая методика исследований, научная новизна. Аналитический обзор литературных данных, посвященных теме диссертации;

- во 2 семестре – методика экспериментальных или численных исследований: выбор параметров физического и численного моделирования;

- в 3 семестре – проведение физических опытов и экспериментов. Обработка и анализ результатов физических и численных экспериментальных исследований.

3. Завершающий этап. Обработка и систематизация результатов экспериментальных и теоретических исследований. Анализ полученных результатов экспериментальных и теоретических исследований, сопоставление полученных результатов с результатами аналогичных исследований. Составление и оформление отчетов по практике.

4. СТРУКТУРА И ЭТАПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

Научно-исследовательская работа проходит ряд этапов, которые составляют структуру любого научного исследования (рис. 1). Содержание и состав научно-исследовательской работы обучающегося представляются в виде индивидуального плана.

1. *Подготовительный этап.* Ознакомление обучающегося с перечнем предлагаемых направлений исследования, выбор области исследования и будущей темы научной работы.

2. *Постановка проблемы* исследования, а также определение объекта и предмета, разработка целей и задач научного исследования.

3. *Выдвижение рабочей (первоначальной) гипотезы* на основе четко сформулированной цели и задач исследования. Здесь же составляется план предполагаемой работы по теме исследования.

4. *Теоретическое исследование.*

– Сбор информации об уже имеющихся в науке знаниях по исследуемому объекту и изучаемой проблематике, их анализ и обобщение.

– Разработка рабочей теории (концепции) и выбор методик и методов исследования.

– Составление аналитического (литературного) обзора.

5. *Экспериментальное исследование.*

– Проведение исследования.

– Анализ и обработка полученных экспериментальных данных.

6. *Анализ и сопоставление результатов.* Данный этап проходит после теоретических и экспериментальных исследований, следствием анализа и сопоставления результатов является окончательное подтверждение выдвинутой гипотезы и формирование следствий, вытекающих из нее, либо необходимости ее видоизменения. В некоторых случаях на основе выполненного анализа гипотеза может быть опровергнута.

7. *Заключительный этап – выводы и рекомендации.* На этапе заключительных выводов подводятся итоги исследования, т.е. формируются полученные результаты и определяется их соответствие поставленной цели. Данный этап включает в себя письменное оформление теоретического и эмпирического материала в виде целостного текста.

8. *Освоение.*

– Представление работы на рецензирование.

– Представление к защите и защита работы на заседании государственной экзаменационной комиссии (возможно в виде итоговой конференции).

Разделы НИР

Этапы выполнения НИР

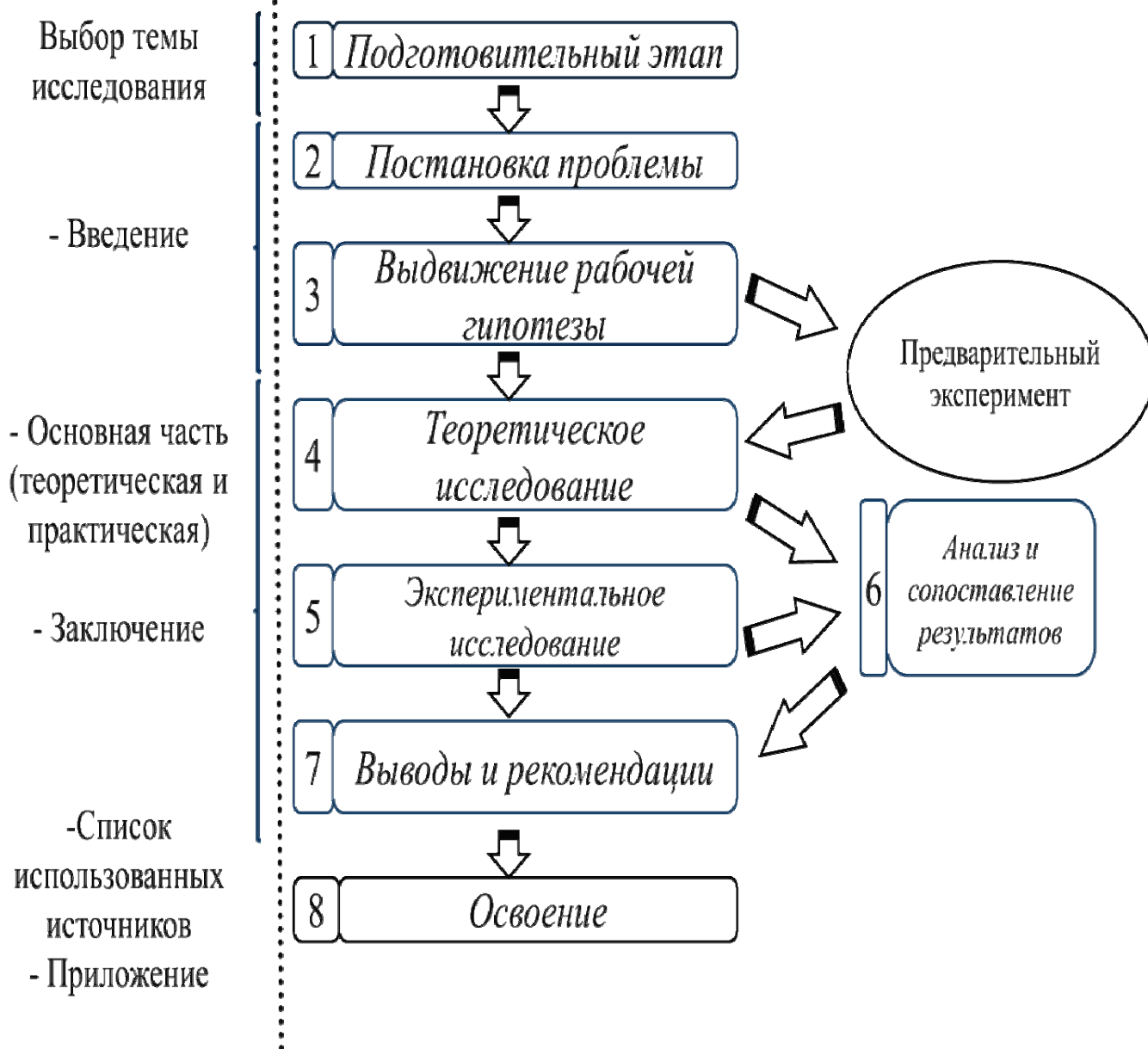


Рисунок 1 – Разделы и этапы выполнения научно-исследовательской работы

5. ОПИСАНИЕ ЭТАПОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

5.1. Подготовительный этап

В начале своей научной деятельности обучающийся зачастую сталкивается с очень важным вопросом: «А с чего стоит начать?». Хорошо, если до поступления в магистратуру обучающийся уже занимался научно-исследовательской работой и знает некоторые нюансы ее выполнения, в этом случае ему не составит труда включиться в подобную деятельность. Для тех, кто все же не уверен в своих силах, данный раздел прояснит основные моменты, связанные с научно-исследовательской работой (НИР) и даст общее представление о том, что магистрант должен сделать, чтобы его работа была высоко оценена.

В начале исследования необходимо определить область исследования (например, химия, физика, экология). Вместе с этим также необходимо определить круг лиц, которые будут направлять вашу работу (научный руководитель, консультанты), места, откуда вы будете черпать информацию (книги, интернет), и технические ресурсы, которыми вы располагаете.

Следующим обязательным подпунктом подготовительного этапа является выбор темы исследования.

Нередко руководители научных работ предлагают обучающимся уже имеющуюся тему. Как правило, это является приемлемым, так как ввиду соответствующего практического опыта руководитель способен адекватно оценить ваши временные ресурсы и способности. В таком случае ваша первоочередная задача – проанализировать подобные работы по теме исследования.

Темой исследования не может быть раздел предметной области (например, «Физические явления в химии»), не может быть отдельная тема учебного курса (например, «Великая французская революция»). При этом понятно, что, чем меньше слов в названии темы, тем она шире, и наоборот. Удачная в смысловом отношении формулировка темы уточняет проблему, очерчивает рамки исследования, конкретизирует основной замысел, создавая тем самым предпосылки успеха работы в целом.

Приведем некоторые общие правила выбора темы.

Тема исследования должна быть вам интересна, должна вас увлекать.

Тема должна быть выполнима, решение ее должно принести реальную пользу участникам исследования.

Тема должна быть оригинальной, в ней необходим элемент неожиданности, но при всем этом она должна быть актуальна.

Тема должна быть такой, чтобы работа могла быть выполнена в сроки, предусмотренные магистерской программой (2 года).

В выборе темы помогут вопросы: что вы изучаете в данной теме, зачем, почему, к чему в конечном итоге вы стремитесь?

5.2. Этап постановки проблемы

Еще одной важной составляющей научно-исследовательской работы является постановка проблемы. Следует отметить, что зачастую поиск проблемы требует больших усилий, нежели ее решение. Сформулировать научную проблему – значит показать умение отделить главное от второстепенного, выяснить то, что уже известно и что пока неизвестно о предмете исследования.

Ставя проблему, исследователь отвечает на вопрос: «Что нужно изучить из того, что раньше не было изучено?».

И помните, что, во-первых, проблема должна быть не надуманной, а реальной, интерес должен быть не искусственным, а настоящим. Только в этом случае в полной мере активизируется исследовательская деятельность. Во-вторых, встающая перед Вами проблема должна быть в первую очередь вам по силам, т.е. доступной. В противном случае, как показывает практика, обучающийся прекращает заниматься исследовательской деятельностью.

После выдвижения проблемы предполагается обоснование актуальности исследования.

Актуальность темы исследования – это степень ее важности в данный момент и в данной ситуации для решения конкретной проблемы.

При ее формулировании необходимо дать ответ на вопрос: почему данную проблему нужно изучать в настоящее время?

Раскрытие актуальности темы исследования может быть связано:

- с изученностью выбранной темы не в полном объеме. В данном случае исследование актуально именно потому, что определенные аспекты темы изучены не в полной мере, и проводимое исследование направлено на преодоление этого пробела;

- с возможностью решения определенной практической задачи на основе полученных в исследовании данных.

После изложения актуальности необходимо определить объект и предмет исследования.

Объектом научного исследования выступает материальная или идеальная система, т.е. то, на что направлено познание, или явление, порождающее проблемную ситуацию и избранное для изучения.

Предмет исследования более конкретен и дает представление о том, как новые отношения, свойства или функции объекта рассматриваются в исследовании. Предмет устанавливает границы научного поиска в рамках конкретного исследования.

Таким образом, объект – это целое, а предмет является частью объекта. Изучается именно предмет, т. е. конкретное свойство объекта. Например, в научно-исследовательской работе «Бутилированная вода как альтернативный источник питьевого водоснабжения» объектом исследования является бутилированная вода, а предметом исследования – физические и химические свойства данной воды.

Границы между объектной областью, объектом и предметом условны и

подвижны. То, что в одном случае является объектом исследования, в другом случае может стать предметом. Предмет изучения должен отражаться в теме научно-исследовательской работы.

Из предмета исследования вытекают цель и задачи исследования.

Под целью исследования понимают конечные научные и практические результаты, которые предполагается получить при выполнении исследования. Цель может начинаться, например, со следующих слов:

- выявление... ;
- исследование... ;
- установление... ;
- оценка... ;
- анализ... ;
- разработка... ;
- обоснование... ;
- изучение... .

При этом следует помнить, что цель не должна дословно повторять тему работы или отличаться от нее лишь несколькими словами. Например, целью проекта «Экологическая оценка видового состава орнитофауны» **не может быть** «...изучение и экологическая оценка видового состава орнитофауны». **Правильный вариант:** целью данной темы является «...изучение видового разнообразия птиц и их систематизация».

Таким образом, тема должна быть сформулирована кратко, а ее основные моменты расшифровываются уже в цели.

Необходимо также отметить, что в исследовании может быть только одна цель.

Цель достигается через решение определенных задач.

Задачи – это последовательные, пошаговые этапы, которые обеспечивают достижение поставленной цели и конкретизируют ее. Задачи лучше всего формулировать в виде утверждения того, что необходимо сделать, чтобы цель была достигнута. Формулировка задачи должна начинаться с глагола, например:

- выявить... ;
- разработать... ;
- провести... ;
- решить... ;
- проанализировать... ;
- обобщить... .

Формулировка задач тесно связана со структурой исследования, причем отдельные задачи могут быть поставлены как для теоретической (обзор литературы по проблеме), так и для экспериментальной части исследования.

Задачи определяют содержание исследования и структуру текста работы. Заголовки глав рождаются именно из формулировок задач. Задачи исследования показывают, что обучающийся собирается делать и каким образом он намерен достичь поставленной цели исследования. При этом задачи должны быть взаимосвязаны и отражать общий путь достижения цели.

Таким образом, цель должна вытекать из названия работы, задачи – из цели, (т.е. ее конкретизировать), выводы в конце работы должны соответствовать поставленным задачам.

5.3. Этап выдвижения гипотезы

Следующим важным этапом работы над исследованием является выдвижение гипотезы исследования.

Гипотеза исследования – это развёрнутое предположение, подробно излагающее модель, методику, систему мер, т. е. технологию того нововведения, в результате которого ожидается достижение цели исследования.

Гипотеза – это предвидение событий.

В отличие от цели исследования, гипотез может быть несколько – какие-то из них подтвердятся, какие-то – нет. Изначально гипотеза не истинна и не ложна – она просто не определена. Однако стоит только ее подтвердить, как она становится теорией; если ее опровергнуть, она также прекращает свое существование, превращаясь из гипотезы в ложное предположение. Другими словами, в ходе работы (эксперимента) гипотеза может быть либо подтверждена, либо опровергнута.

Как происходит формулирование рабочей гипотезы?

Поскольку гипотеза содержит предположение, то это должно звучать в ее формулировке. Например: «Я предполагаю, что причиной повышения ПДК оксида серы (IV) является строительство новой фабрики в данном районе».

Гипотеза формулируется в виде сложноподчинённого предложения с использованием словесных конструкций типа:

- «если..., то...»;
- «так..., как ...»;
- «при условии, что...».

При формулировке гипотезы следует помнить, что она должна удовлетворять ряду требований:

- быть проверяемой;
- содержать предположение;
- быть логически непротиворечивой;
- соответствовать фактам;
- иметь правильное стилистическое оформление.

Построение гипотез – основа исследовательского, творческого мышления. Гипотезы позволяют делать новые открытия и затем в ходе теоретического анализа, мысленных или реальных экспериментов оценивать их вероятность. Таким образом, гипотезы дают возможность увидеть проблему в другом свете, посмотреть на ситуацию с иной стороны.

После формулировки гипотезы следует этап определения методов исследования. Метод – это способ достижения цели исследования. От выбора метода зависит сама возможность реализации исследования – его проведения и получения определенного результата. Методы должны согласовываться с изучаемым явлением, соответствовать ему.

Все методы научного исследования условно делятся на следующие два блока:

1) методы, направленные на теоретическое изучение проблемы, например, на изучение литературных источников, письменных, архивных материалов;

2) методы, обеспечивающие получение практических результатов исследования проблемы: наблюдение, беседа, анкетирование, эксперимент.

Методы исследования обеспечивают большую точность и глубину изучения избранной проблемы, обеспечивают решение поставленных в работе задач.

5.4. Этапы теоретического и практического исследования

После выбора темы, определения целей и задач исследования любая работа начинается с составления предварительного плана, пусть и в самой общей форме. Он необходим для того, чтобы знать, по каким вопросам следует собирать материал. По мере изучения и первичного ознакомления с литературой принятый план, безусловно, будет видоизменяться. Однако ориентировочный план даст возможность связать в единое целое разнообразную информацию. Поэтому такой план надо составить как можно раньше, и в его формировании незаменима помощь научного руководителя.

Необходимым компонентом плана является установление сроков исследования. Сроки должны быть достаточны для проверки воспроизводимости, надёжности и стабильности результатов, их обсуждения и апробации.

Задачи, сроки и план исследования должны соответствовать выбранному ранее объекту, предмету и цели исследования.

Только после подготовительного этапа, имея (и самое главное, понимая) цель, задачи исследования, а также предварительный план работы, можно переходить к выполнению исследовательской работы. Любая исследовательская работа состоит из следующих частей (рис. 1):

- введение (где отражены актуальность проблемы, объект и предмет исследования, цель и задачи, первоначальная гипотеза);
- основная часть (в которой раскрывается содержание работы: теоретическая и практическая части);
- заключение (в котором содержатся итоги работы, выводы и рекомендации);
- список использованных источников (представляет собой перечень использованных книг, статей и веб-сайтов);
- приложение (наглядное представление опытных данных в виде таблиц, схем, диаграмм и т.п.).

Главы основной части посвящены раскрытию содержания научно-исследовательской работы.

Первая глава основной части работы обычно целиком строится на основе анализа научной литературы и составлении аналитического

(литературного) обзора. Основными целями аналитического обзора являются:

- определение уровня достижения целей и задач научного исследования;
- установление степени новизны возникших идей;
- определение или уточнение возможных направлений практической реализации этих идей.

К задачам аналитического обзора относится не перечисление всех известных фактов, а их критическое осмысление и анализ.

Составление аналитического обзора можно разбить на следующие действия или этапы:

- 1) поиск и хранение информации по теме исследования;
- 2) анализ информации и подготовка аналитического обзора.

Поиск и хранение информации. Поиск необходимой информации по теме исследования – довольно трудоемкая работа. Многие исследователи на поиск информации тратят до 25 % своего рабочего времени. Обязательными на данном этапе исследований считаются следующие операции:

- поиск в потоке информации необходимых источников;
- непосредственная работа с источником;
- выделение нужных сведений;
- обеспечение хранения полученных сведений.

Как отыскать именно те источники, которые необходимы вам? Существует несколько подходов в зависимости от того, занимались ли вы или ваш руководитель родственными проблемами или это область, совершенно новая для вас.

Если эта проблема незнакома вам и вашему руководителю, то следует начинать с изданий энциклопедического характера. Значительно ускоряет поиск информации найденный обзор учебников, монографий, энциклопедий, справочников по интересующей вас теме, так как:

- в обзоре достаточно полно анализируется информация на дату его публикации (за исключением 1-3 последних лет);
- обзор позволяет выявить на сегодняшний день лидеров по теме исследований;
- материалы обзора знакомят со спецификой темы исследования (сопутствующими проблемами, терминологией и т.д.).

Поиск информации за несколько последних лет лучше проводить по реферативным журналам.

Немаловажное значение при составлении аналитических обзоров играет задание глубины поиска исследователем.

Глубина поиска – это количество лет, за которые вы предполагаете проводить поиск литературы; определяется целями и задачами научного исследования. Единых подходов к выбору глубины поиска информации не существует. Обычно для научно-исследовательской работы в области точных наук глубина поиска устанавливается в 10 лет. Однако на выбор допустимого «возраста» собираемой информации оказывают влияние многие факторы, к ним, в частности, относятся масштаб научных исследований (чем масштабнее, тем глубина поиска будет больше), область науки, дефицит источников

информации, времени и средств у исследователя.

Считается, что выбор глубины поиска информации важен лишь на начальных стадиях исследования, а в дальнейшем исследователь должен знать информацию по изучаемому вопросу за многие годы.

Для ориентировочной оценки глубины поиска на начальных стадиях рекомендуют использовать «полупериод жизни» публикаций. Это время, в течение которого была опубликована половина цитируемой в данный момент литературы по соответствующей области знания. Для химических наук это около 8 лет (а, например, физика – 5; математика – 10,5 лет).

Необходимо знать, что возраст информации (т.е. насколько давно она была получена) зависит от вида источников информации. Он увеличивается в следующем ряду:

- средства оперативной массовой информации, такие, как радио, телевидение, – минимальный возраст информации составляет минуты и часы;
- ежедневные издания, например, газеты и журналы, – от одних суток до одной недели;
- периодические издания (журналы, еженедельники, бюллетени и т.д.) – от недели до нескольких месяцев;
- реферативные журналы (например, «Химия») – 6 месяцев;
- неперіодические издания (книги, сборники) – 1 год и более.

Выбор источников информации зависит также от целей и задач научного исследования. Так, например, если при выполнении научных исследований планируется создать новый объект техники и осуществить его правовую защиту (запатентовать), то необходимо использовать и специальные вторичные источники патентной информации (например, периодический журнал «Изобретения стран мира»). Если же в цели научных исследований входит организация промышленного производства на новом объекте, то в этом случае трудно обойтись без специальных источников экономической информации.

Отбор и хранение найденной информации рекомендуется проводить постоянно, так как она может пригодиться не только для данного, но и для последующих исследований.

Система хранения информации у каждого исследователя может быть своя, но она должна обеспечивать минимальное время поиска конкретной информации. Существует несколько полезных советов по отбору и хранению информации. Каждый найденный вами документ (информация) должен обязательно содержать:

- сведения об источнике информации;
- название работы на языке оригинала;
- данные об авторах и выходные данные работы;
- краткое содержание работы (реферат) и ваше отношение к ней;
- специальные отметки (например, шифр книги, если она находится в библиотеке, ссылку на сайт, если это данные из Интернета и др.);
- сведения о том, где и для чего может понадобиться этот документ.

Составление аналитического обзора. Аналитический (литературный) обзор – это текст, содержащий не перечисление всех известных фактов, а критически проанализированную информацию по исследуемой проблеме или проблемам, извлеченную из довольно большого количества специально подобранных литературных источников.

До написания обзора вся собранная информация должна быть предварительно систематизирована. Принципы систематизации могут быть разными. Однако наиболее приемлемой представляется систематизация материала по способам решения проблемы. Обзор должен быть продуктом творческого труда и содержать отношение автора к приводимой информации, ее анализ. В процессе изложения материала целесообразно отразить следующие аспекты:

- определить, уточнить используемые в работе термины и понятия;
- изложить основные подходы, направления исследования по изучаемой проблеме, выявить, что известно по данному вопросу в науке, а что – нет, что доказано, но недостаточно полно и точно;
- обозначить виды, функции, структуру изучаемого явления;
- перечислить особенности формирования (факторы, условия, механизмы, этапы) и проявления («признаки, нормативное и патологическое функционирование») изучаемого явления.

Вторая глава основной части работы представляет собой экспериментальное исследование или научно поставленный опыт. Зачастую это наиболее сложный и трудоемкий этап научного исследования.

Цель эксперимента зависит от характера научного исследования и последовательности его проведения. Если эксперимент проводится после теоретического исследования, он подтверждает, либо опровергает результаты разработанной теории. В случае отсутствия достаточной теоретической базы эксперимент часто предшествует теоретическому обоснованию. При таком порядке проведения исследования теория объясняет и обобщает результаты эксперимента.

В отличие от наблюдения в эксперименте исследователь активно воздействует на исследуемый объект путем создания искусственных управляемых условий, необходимых для установления причинных связей между исследуемыми признаками (феноменами).

На данном этапе очень важно, чтобы обучающийся не просто добросовестно использовал предоставленную ему стандартную методику или механически выполнял поставленные перед ним задачи, а понимал суть протекающих в эксперименте процессов и явлений.

В опытно-экспериментальной части обязательно должны быть представлены:

- обоснование выбора тех или иных методов и конкретных методик исследования. (При описании методик обязательными данными являются: ее название, автор, показатели и критерии, которые в дальнейшем будут подвергаться статистической обработке.);
- сведения о процедуре исследования и ее этапах. (Приводится список

всех признаков, которые были включены в обработку, описание математико-статистического анализа, сведения об уровнях значимости, достоверности сходства и различий);

- характеристика используемого оборудования, биологических объектов и химических реактивов.

Существенной частью работы является представление и обсуждение полученных результатов. Если таблицы, содержащие экспериментальные данные исследований, получились громоздкими, их лучше дать в приложении.

Соблюдение данных правил позволит представить вашу работу методически грамотной, а результаты – правильно обработанными (например, если у вас результаты представлены в виде графиков, то на них обязательно должны быть нанесены погрешности).

В целом, при написании основной части работы целесообразно каждый раздел завершать кратким резюме или выводами. Они обобщают изложенный материал и служат логическим переходом к последующим разделам. При их составлении необходимо учитывать следующие правила:

- выводы должны являться следствием данного исследования и не требовать дополнительных измерений;
- выводы должны соответствовать поставленным задачам;
- выводы должны формулироваться лаконично, не иметь большого количества цифрового материала;
- выводы не должны содержать общеизвестных истин, не требующих доказательств.

Этап теоретического и практического исследования должен быть представлен в виде отчета о проделанной работе, как промежуточного, так и заключительного, в соответствии с разработанным индивидуальным планом.

5.5. Этап анализа проделанной работы, основные выводы и рекомендации

Изложение содержания работы заканчивается заключением, которое представляет собой краткий обзор выполненного исследования. В нем автор может вновь обратиться к актуальности изучения темы в целом, дать оценку эффективности выбранного подхода, а также подчеркнуть перспективность изучения темы в будущем.

Необходимо помнить, что заключение не должно представлять собой механическое суммирование выводов, находящихся в конце каждой главы основной части. Оно должно содержать то новое, существенное, что составляет итоговые результаты исследования, т.е. должно быть кратким, обстоятельным и соответствовать целям, задачам и гипотезе исследования.

Вывод – умозаключение, содержит аналитическую оценку ситуации, намечает перспективы исследования.

Рекомендация – советы автора работы по решению данной проблемы.

В конце магистерской диссертации обязательно оформляется список использованных источников, куда заносятся только использованные в тексте

работы источники. Причем использованными считаются только те работы, на которые есть ссылки в тексте, а не все статьи, монографии, которые прочитал автор в процессе выполнения научно-исследовательской работы.

Информация о каждом издании должна включать в строгой последовательности фамилию, инициалы автора, название издания, выходные данные издательства, год издания, № выпуска (если издание периодическое), количество страниц. Все издания должны быть пронумерованы и расположены в порядке их упоминания в тексте. Список использованных источников оформляется в соответствии с ГОСТ.

В Приложении помещаются материалы объемного характера. Туда можно отнести первичные таблицы, графики, схемы, фотографии и др. По своему содержанию приложения могут быть разнообразного плана: справочники, нормативно-правовая документация и т.д.

5.6. Этап освоения

Исследовательская работа должна носить логически завершенный характер и демонстрировать способность обучающегося грамотно пользоваться специальной терминологией, ясно излагать свои мысли, аргументировать предложения, поэтому заключительным этапом исследовательской работы является ее публичная защита. При этом обучающийся должен понимать, что объем выполненной им работы еще не гарантирует успешное выступление.

Одна из основных задач, стоящих перед исследователем – это умение изложить материал в соответствующей форме и последовательности. От этого в значительной степени зависит оценка вашей работы. Главное требование к научному изложению – точность, ясность, краткость, а также грамотное оформление. Кроме того, чтобы работа получила достойную оценку, обучающийся должен уметь отстаивать свое мнение в научной полемике во время защиты работы.

6. МЕТОДЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

6.1. Основные термины и понятия планированного эксперимента

Под **планированным экспериментом** подразумевается эксперимент, который реализуется по некоторому плану, определяемому до начала эксперимента. Конечной целью планированного эксперимента является получение математической модели исследуемого процесса. Под **математической моделью** понимают функцию, связывающую исследуемые параметры с факторами, влияющими на процесс. В дальнейшем параметры, подвергаемые экспериментальному изучению, будем называть **выходными параметрами**.

Факторы, влияющие на процесс и варьируемые (изменяемые) нами при постановке опытов, будем называть **входными параметрами**. Обычно входные параметры изменяются, принимая определенные (заранее заданные) значения на нескольких уровнях. Наиболее важным на всех этапах исследования является основной уровень, представляющий собой геометрический центр тяжести всех уровней факторов.

Координатное пространство, на осях которого откладывают значения исследуемых факторов, называют **факторным пространством**. Факторное пространство в большинстве случаев видоизменяют таким образом, чтобы основной уровень совпадал с началом координат, почему его иногда называют **нулевым уровнем**. Натуральные значения входных параметров обычно приводят к виду, при котором опытные точки располагают вокруг основного (нулевого) уровня симметрично. Операция преобразования переменных в целях симметричного расположения уровней факторов и смещения основного уровня в начало координат называется **кодированием факторов**.

Параметрическую математическую модель функции отклика, определяемую с помощью методов планированного эксперимента, представляют обычно в виде полинома n -й степени. Цель эксперимента состоит в том, чтобы оценить значения коэффициентов этой модели и доказать ее **адекватность**, то есть что ее можно использовать для анализа выходного свойства исследуемого процесса. Следует отметить, что математическая модель функции отклика любой сложности не может быть тождественна истинной функции отклика хотя бы потому, что в модели невозможно учесть все факторы, которые влияют на выходную величину (модель не тождественна оригиналу). Именно по этой причине нельзя говорить о существовании истинных значений коэффициентов математической модели функции отклика

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (1)$$

где y – изучаемое свойство системы (входной параметр);

x_i – факторы, определяющие протекание процесса (входные параметры);

$b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}, \dots$ – эмпирически определяемые коэффициенты.

Индексы i, j здесь и далее означают номер фактора, k – количество факторов.

Выбор именно полиномиальных моделей для описания поверхности отклика при планировании эксперимента объясняется тем, что с их помощью любая аналитическая функция может быть описана как угодно точно. Практически задача экспериментатора сводится к определению коэффициентов в уравнении (1). Истинное значение указанных коэффициентов определить из экспериментальных данных не представляется возможным, можно говорить лишь о степени приближения их к истинному значению. Приближенную математическую модель, представляющую собой конечный степенной ряд с рассчитанными коэффициентами, называют **уравнением регрессии**. Процедура расчета коэффициентов известна как **регрессионный анализ**.

Чем точнее полученное уравнение описывает процесс, тем ценнее сделанные по нему выводы и тем эффективнее труд экспериментатора. Соответствие математической модели объективно существующей функции отклика называют **адекватностью**, а процедуру проверки полученного уравнения для описания опытных точек понимают, как **исследование на адекватность**. По сути, адекватность должна определяться как соответствие требованию, ограничивающему отклонения модели от истинной функции отклика. Поскольку модель не тождественна истинной функции отклика, такое отклонение есть достоверное событие, а значит, условие адекватности должно формироваться в виде ограничения на это отклонение. С практической точки зрения, вероятности ошибок 1-го и 2-го рода следует ограничить малыми пределами и сформировать план эксперимента, который ограничил бы выполнение этих ограничений. Уравнение адекватно описывает результаты опытов, если квадратичное отклонение значений выходного параметра (рассчитанных по уравнению регрессии) от экспериментальных данных обусловлено только ошибкой воспроизводимости.

Под **ошибкой воспроизводимости** понимают то, насколько точно можно воспроизвести результаты данного опыта при повторении его в условиях экспериментирования, к которым предъявляются весьма жесткие требования. Точность, с которой задаются независимые переменные (входные параметры), должна быть значительно более высокой, чем точность измерения выходного параметра.

Заметим, что все неточности и ошибки измерительных задач возникают из-за наличия в результатах измерения случайной погрешности, которая согласно Федеральному закону «Об обеспечении единства измерений» не должна выходить за установленные пределы с заданной вероятностью. Именно это требование должно соблюдаться при решении любой измерительной задачи, в том числе и при оценке адекватности математической модели функции отклика.

Оценка ошибки воспроизводимости опытных значений, так же как и проверка адекватности полученных уравнений, осуществляется с помощью специальных методов математической статистики. Значение ошибки воспроизводимости, возведенное в квадрат, известно, как **дисперсия**

воспроизводимости или как **дисперсия опыта**. Квадратичное отклонение значений выходного параметра от экспериментальных данных при фиксированных независимых переменных называют **дисперсией адекватности** или **остаточной дисперсией**. Во всех случаях вначале определяют дисперсию и лишь после этого рассчитывают соответствующую ошибку, для чего достаточно извлечь корень из дисперсии. По этой причине ошибку воспроизводимости иногда называют **среднеквадратичной ошибкой** ввиду того, что дисперсия опыта обычно представляет собой среднее от значений нескольких опытов.

Вывод о правомочности полученного уравнения для описания исследуемого процесса (иными словами, вывод об адекватности или неадекватности уравнения) делают чаще всего, сравнивая между собой дисперсию воспроизводимости ($S_{\text{воспр}}^2$) (дисперсию опыта) с дисперсией адекватности ($S_{\text{ад}}^2$). Обычно сравнение дисперсий производят с помощью **критерия Фишера**:

$$F_{\text{табл}} \geq F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{воспр}}^2}. \quad (2)$$

Значения $F_{\text{табл}}$ берем из таблиц. Метод математической статистики, позволяющий рассчитать (оценочно) значения указанных дисперсий, известен как **дисперсионный анализ**.

С понятием «дисперсия» неразрывно связано понятие «**число степеней свободы**». Так, в уравнении (2) $S_{\text{ад}}^2$ и $S_{\text{воспр}}^2$ определены каждая со своим числом степеней свободы. Под понятием «степени свободы» понимают ограничения или связи, накладываемые в процессе исследования на изменение исследуемого параметра, в данном случае дисперсии. Расчет числа степеней свободы, а в наиболее простых случаях и расшифровка накладываемых ограничений приведены в последующих разделах.

Исследователя всегда интересует вопрос, насколько велика вероятность ошибки при определении той или иной величины (например, значений коэффициентов в уравнении регрессии, критерия Фишера и т.д.). Вероятность того, что истинное значение искомого параметра лежит в заданных при расчетах пределах определяется **уровнем значимости α** . Уровень значимости (степень риска) задается обычно в процентах или долях. Чем больше значение уровня значимости, тем меньше вероятность совершить ошибку первого рода, то есть тем меньше вероятность просмотреть верные результаты. Требования к разбросу значений определяемых параметров и рассчитываемых коэффициентов при этом ужесточаются.

Величина, равная $100 - \alpha$ или $1 - \alpha$, называется **доверительной вероятностью (β)** или надежностью того или иного параметра. Величину β обычно не задают чрезмерно высокой. Для технологических расчетов β , как правило, берут равным 95 % (α соответственно 5 % или 0,05).

Коэффициенты в уравнении регрессии, так же как и их дисперсии, не всегда определяются независимо. Очень часто значения некоторых из них зависят от значений других в этом же уравнении. Насколько велика связь

между коэффициентами (или дисперсиями), можно судить по значению **ковариации**. Так, если значение коэффициента b_0 связано с определением коэффициентов b_{ii} и зависит от абсолютного значения последних, говорят, что $\text{cov}(b_0 b_{ii})$ (ковариация между коэффициентами) равна такому-то числу.

Ковариация является неудобной характеристикой, так как абсолютное ее значение зависит от значения дисперсии и по ней трудно судить о степени (тесноте) связи. Поэтому был введен **коэффициент корреляции**, вычисляемый по формуле:

$$r(b_0 b_{ii}) = \frac{\text{cov}(b_0 b_{ii})}{\sqrt{S^2 b_0 S^2 b_{ii}}}. \quad (3)$$

Коэффициент корреляции меняется в пределах от -1 до $+1$ и является характеристикой тесноты линейной связи.

К наиболее употребляемым следует отнести планы полного и дробного факторных экспериментов и построенные на их основе композиционные планы. Кроме указанных, широко известны и довольно часто используются симплекс-планы.

Эффективность использования каждого из планов меняется в широких пределах в зависимости от решаемых исследователем задач. Наиболее простыми являются планы, применяемые при отсеивании незначимых факторов, при оптимизации и получении линейных моделей.

При необходимости описания процесса нелинейной моделью **планы первого порядка** обычно оказываются неэффективными. В таком случае приходится реализовывать планы более высоких порядков (более высокой разрешающей способности).

Порядок плана определяется степенью полинома (уравнения регрессии), выбранного для описания процесса. Степень полинома может быть задана первой, второй, третьей и т.д., соответственно и планы выбираются первого, второго, третьего и т.д. порядков. Так, для двух факторов ($k = 2$) уравнение (4) будет являться полиномом (моделью, уравнением регрессии) первой степени (линейной моделью), уравнение (5) – второй степени, уравнение (6) – третьей степени:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2; \quad (4)$$

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2; \quad (5)$$

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{112} x_1^2 x_2 + b_{221} x_2^2 x_1 + b_{111} x_1^3 + b_{222} x_2^3. \quad (6)$$

Технолог в своей исследовательской практике в абсолютном большинстве случаев вынужден ограничиваться получением моделей первого, второго и неполного второго порядков. Однако указанное ограничение, как правило, не сказывается на эффективности исследования, так как исследуемое факторное пространство в выбранных пределах изменения переменных в очень редких случаях содержит больше одной экстремальной точки. Значит, модели второго порядка при правильной постановке задачи бывает достаточно для описания процесса.

6.2. Планы первого порядка

Планы первого порядка рекомендуют применять в самом начале исследования, когда вид аппроксимирующей функции неизвестен. Если окажется, что уравнения первой степени недостаточно для описания процесса, постановкой специальных опытов план можно достроить и получить при этом информацию, достаточную для расчета коэффициентов при нелинейных членах. Планы, полученные путем «достройки», называют **композиционными**.

Ядром композиционных планов являются планы **полного факторного и дробного факторного экспериментов** (ПФЭ и ДФЭ соответственно), представляющие собой типичные реализации планов первого порядка.

В планах первого порядка значения варьируемых переменных изменяются на двух уровнях, то есть каждая переменная может принимать всего лишь два значения. Верхний уровень обозначают +1, нижний –1. В дальнейшем мы будем обозначать эти величины соответственно знаками «+» и «–». Такая процедура представления переменных известна как **кодирование факторов**. Всевозможные сочетания уровней факторов, при которых реализуются опыты, представляют собой план ПФЭ.

Построение планов ПФЭ. Построение планов ПФЭ, как и всех остальных, начинается с выбора основного уровня и интервалов варьирования (интервалов изменения переменных). Напоминаем, что основной уровень – это точка в факторном пространстве, окрестности которой подлежат экспериментальному исследованию.

Пример 1. На выход продукта A оказывают влияние температура (t), продолжительность (τ) и давление (p) в реакторе при неизменных остальных параметрах.

Задаемся основным уровнем по каждой независимой переменной: по температуре t_0 , продолжительности τ_0 , давлению p_0 (табл. 1). Значение основного уровня факторов обозначают обычно как 0. После этого задаемся интервалами варьирования Δt , $\Delta \tau$, Δp соответственно. Тогда верхний уровень «+» факторов будет равен: для температуры $t_0 + \Delta t$, для продолжительности $\tau_0 + \Delta \tau$ и для давления $p_0 + \Delta p$. Нижний уровень этих факторов «–» соответственно: $t_0 - \Delta t$, $\tau_0 - \Delta \tau$, $p_0 - \Delta p$. Сразу задаемся численными значениями всех указанных величин.

Таблица 1

Фактор	Значение факторов для примера 2.1 и их интервалы варьирования			
	–1	0	+1	интервал варьирования
x_1 – температура, °С	250	$t_0 = 300$	350	$\Delta t = 50$
x_2 – продолжительность, мин	90	$\tau_0 = 120$	150	$\Delta \tau = 30$
x_3 – давление, МПа	3	$p_0 = 4$	5	$\Delta p = 1$

Возможные сочетания уровней факторов для нашего примера в кодированных и натуральных переменных представлены в таблице 2.

Таблица 2

№ п/п	Температура		Продолжительность		Давление	
	$t_1, ^\circ\text{C}$	x_1	$\tau, \text{мин}$	x_2	$p, \text{МПа}$	x_3
1	250	–	90	–	3	–
2	350	+	90	–	3	–
3	250	–	150	+	3	–
4	350	+	150	+	3	–
5	250	–	90	–	5	+
6	350	+	90	–	5	+
7	250	–	150	+	5	+
8	350	+	150	+	5	+

Каждая строчка табл. 2 определяет условия проведения опытов. Так, первый опыт проведем при температуре 250 °С, продолжительности 90 мин и давлении 3 МПа. Второй опыт реализуем при температуре 350 °С, продолжительности 90 мин, давлении 3 МПа и т.д. Всего опытов для $k = 3$ восемь. Для двух факторов число опытов в полном факторном эксперименте будет $2^2 = 4$; для четырех $2^4 = 16$; для пяти $2^5 = 32$ и т.д.

Обратим внимание на чередование знаков в столбцах x_1, x_2, x_3 . В столбце x_1 знаки чередуются через единицу, то есть принимают значения «–», «+», «–», «+» и т.д. В столбце x_2 эти чередования уже через две единицы (два знака «–», два «+», два «–», два «+»), в столбце x_3 через четыре единицы (четыре знака «–», четыре «+»). Для i -го фактора чередования будут осуществляться через 2^{i-1} единиц. Так, для $i = 5$ знаки в столбце x_5 будут чередоваться через $2^{5-1} = 2^4 = 16$ единиц. В дальнейшем будем обозначать факторы, если они взяты в кодированных переменных, через x_1, x_2, x_3 и т.д.

Составив подобным образом таблицу для любого числа факторов (соблюдая вышеописанное правило чередования знаков «–» и «+»), мы механически находим все возможные сочетания уровней факторов. Подобный метод нахождения этих сочетаний удобен с точки зрения формализации процедуры составления плана. Исследователь вначале составляет план в кодированных переменных, после чего заменяет минусы и плюсы на соответствующие натуральные значения уровней факторов и получает условия реализации опытов в плане ПФЭ.

Геометрически опытные точки в плане ПФЭ можно рассматривать как вершины N -мерного гиперкуба с основным уровнем в центре, где N – число необходимых для реализации плана опытов.

Для $k = 2$ это будет квадрат ($N = 4$), $k = 3$ – куб ($N = 8$) и т.д. (рис. 2). Как видно из рисунка 2, составленные в таблице 2.2 сочетания уровней факторов легко интерпретируются геометрически.

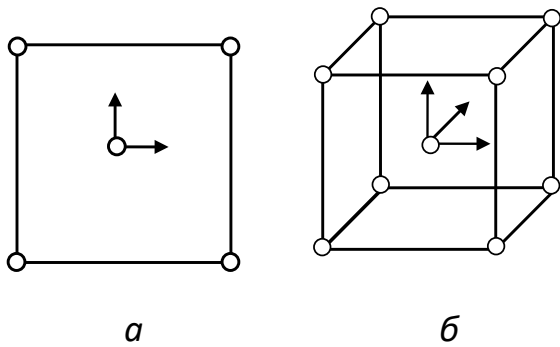


Рисунок 2 – Геометрическое представление опытных точек в плане ПФЭ: $a - k = 2$; $b - k = 3$

Если мы представим значения уровней факторов таблице 2 только в кодированной форме, получим **матрицу планирования**. Условия проведения опытов в матрице планирования обозначены сочетанием «плюсов» и «минусов» по строчкам. Аналогичным образом мы могли составить матрицу планирования для любого числа факторов. При этом введение каждого нового фактора потребует удвоения числа опытов. Для $k = 6$ число опытов в плане ПФЭ равно 64, при $k = 7$ возрастает до 128. Практическая реализация столь

большого количества опытов становится иногда невозможной. В целях уменьшения количества необходимых для постановки опытов на основе плана ПФЭ строят при большом k планы **дробного факторного эксперимента** (планы ДФЭ).

Математическая модель (уравнение регрессии), рассчитанная на основе результатов, полученных при реализации плана ПФЭ для $k = 3$, выглядит обычно следующим образом:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (7)$$

Как видим, на основе результатов плана ПФЭ можно рассчитать в последующем не только коэффициенты при линейных членах (b_1, b_2, b_3), но и коэффициенты, характеризующие **взаимодействия первого порядка** (b_{12}, b_{13}, b_{23})¹. Модели, включающие в себя указанные взаимодействия, относят обычно к моделям не первого, а **неполного второго порядка**.

Перед расчетом коэффициентов составляют обычно расчетную матрицу (табл. 3 для $k = 3$).

Таблица 3

№ П/П	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	+	-	-	-	+	+	+	-
2	+	+	-	-	-	-	+	+
3	+	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	+	-	+	-	-	-
5	+	-	-	+	+	-	-	+
6	+	+	-	+	-	+	-	-
7	+	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+	+

¹ В некоторых случаях при большом k (обычно больше 5) использование плана ПФЭ позволяет оценить коэффициенты при взаимодействиях второго и даже третьего порядка.

Основной расчетной матрицы является матрица планирования. Столбцы x_1 , x_2 , x_3 в таблице 3 представляют собой матрицу планирования для $k = 3$. Столбцы x_1x_2 , x_1x_3 , x_2x_3 , $x_1x_2x_3$ получают умножением соответствующих кодированных значений факторов в строках матрицы. Из таблицы 2.3 видно, что ни один столбец (а их всего 8) не повторяется. Кроме того, количество верхних и нижних уровней факторов («+» и «-» в столбцах) всегда одинаково.

Приведенные признаки являются необходимыми условиями **ортогональности расчетных матриц**, а сами планы по этой причине называют **ортогональными**. Использование ортогональных планов имеет целью упрощение последующих вычислений и получение коэффициентов, не зависящих друг от друга, то есть ковариации между коэффициентами в планах ПФЭ должны быть равны нулю. Это значит, например, что замена нулем любого коэффициента в уравнении модели не изменит значений остальных коэффициентов. Такое свойство ортогональных планов оказывается очень полезным, когда точный вид модели неизвестен, и исследователь использует экспериментальные данные для отбора переменных, существенно влияющих на выходную величину.

Расчет планов ПФЭ. Расчет планов ПФЭ, как и всех остальных, заключается в определении коэффициентов в уравнении регрессии, определении значимости этих коэффициентов и выяснении вопроса, адекватно ли полученное эмпирическое уравнение описывает исследуемое факторное пространство. Обратимся к примеру и попытаемся проследить порядок и смысл вычислений. Воспользуемся матрицей планирования и условиями проведения опытов примера 1 (табл. 3). При реализации опытов примера 1 были получены результаты, характеризующие выходной параметр y (выход продукта), сведенные в табл. 4. Значения y_1 , y_2 в табл. 4 представляют собой экспериментальные данные параллельных опытов (в планах ПФЭ опыты принято дублировать).

Значение \bar{y} является арифметическим средним параллельных опытов. Дублирование опытов необходимо для определения дисперсии воспроизводимости. В дополнение к матрице таблицы 3 в таблице 4 приведены результаты опыта в центре плана (опыт 9), то есть в условиях нулевого уровня. Ниже будет показано, что постановка этого опыта в большинстве случаев является необходимой.

Таблица 4

№ п/п	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	\bar{y}	S_n^2
1	-	-	-	24,0	23,2	23,6	0,32
2	+	-	-	30,1	30,7	30,4	0,18
3	-	+	-	31,5	31,9	31,7	0,08
4	+	+	-	40,0	40,6	40,3	0,18
5	-	-	+	28,9	28,1	28,5	0,32
6	+	-	+	31,7	32,7	32,2	0,50
7	-	+	+	26,9	26,7	26,8	0,02
8	+	+	+	30,0	31,0	30,5	0,50
9	0	0	0	31,1	30,7	30,9	-
							$S_E = 2,10$

Самой первой задачей, стоящей перед исследователем после реализации плана, является оценка экспериментальных данных на воспроизводимость. Прежде всего, рассчитывают **построчные дисперсии** S_n^2 :

$$S_n^2 = \sum_{l=1}^{\gamma} (y_{ln} - \bar{y}_n)^2, \quad (8)$$

где индекс l – номер параллельного опыта;

γ – число параллельных опытов.

Тогда для первой строки $S_n^2 = (23,2 - 23,6)^2 + (24,0 - 23,6)^2 = 0,32$; для второй $S_n^2 = 0,18$ и т.д.

После вычисления построчных дисперсий определяем **сумму квадратов ошибок** S_E :

$$S_E = \sum_{n=1}^N S_n^2 = 0,32 + 0,18 + 0,08 + 0,18 + 0,32 + 0,50 + 0,02 + 0,50 = 2,10.$$

Дисперсию воспроизводимости (дисперсию ошибок наблюдений) вычисляют делением S_E на число степеней свободы f_2 и число параллельных опытов γ , то есть

$$S^2 = \frac{S_E}{f_2 \gamma}. \quad (9)$$

Число степеней свободы дисперсии воспроизводимости в плане ПФЭ при дублировании опытов в строчках плана одинаковое число раз всегда рассчитывается следующим образом:

$$f_2 = N(\gamma - 1). \quad (10)$$

Для нашего случая $N = 8$, $\gamma = 2$, $f_2 = 8$, $S^2 = \frac{2,10}{8 \cdot 2} = 0,131$. При определенном навыке в расчетах S^2 вовсе не обязательно пользоваться столь длительным методом, основанным на применении таблиц. Этот расчет можно осуществить в один прием с использованием формулы

$$S^2 = \frac{1}{N\gamma(\gamma - 1)} \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^{\gamma} (y_{ln} - \bar{y}_n)^2. \quad (11)$$

Для двух параллельных опытов (вариант, наиболее часто встречающийся в исследовательской практике) уравнение (11) приводится к виду

$$S^2 = \frac{1}{N(\gamma - 1)} \sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y}_n)^2. \quad (12)$$

В нашем случае ($\gamma = 2$) расчет будет выглядеть следующим образом:

$$S^2 = \frac{1}{8(2 - 1)} (23,6 - 23,2)^2 + (30,4 - 30,7)^2 + \dots + (30,5 - 31,0)^2 = 0,131.$$

Зная построчные дисперсии и их сумму S_E , мы уже можем оценить воспроизводимость опытов. При планировании эксперимента по плану ПФЭ, в котором опыты дублировались одинаковое количество раз, проверка воспроизводимости осуществляется обычно с использованием критерия Кохрена:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{S_E} \leq G_{\alpha}(\gamma - 1, N), \quad (13)$$

где $G(\gamma-1, N)$ – табличное значение критерия Кохрена при уровне значимости α , как правило, равном 0,05. В нашем случае $G_{0,05} = 0,68$ (табл. 25), тогда

$$G = \frac{0,25}{2,10} = 0,12 < 0,68.$$

Так как значение критерия Кохрена по опытными данным не превосходит его критического значения, взятого из таблиц, мы делаем заключение, что опыты достаточно хорошо воспроизводимы. Если бы по расчету оказалось, что G -критерий, определенный из опыта, превосходит табличный G -критерий, опыт с максимальной дисперсией мы должны были бы исключить из рассмотрения или, в лучшем случае, повторить его в целях выяснения вопроса, случайным ли было отклонение.

Убедившись, что опыты в точках плана воспроизводятся достаточно хорошо (ряд построчных дисперсий **однороден**), приступаем к расчету коэффициентов уравнения регрессии. Для облегчения процедуры вычислений коэффициентов воспользуемся расчетной матрицей плана ПФЭ (для $\kappa = 3$ табл. 3). Заполним столбцы табл. 5 значениями произведений $x_{in} \bar{y}_n$ и $x_{in} x_{jn} \bar{y}_n$, где индекс n означает номер опыта. Строки $\sum_{n=1}^N$ и b_{ij} таблицы заполним в процессе вычислений.

Таблица 5

№ П/П	$x_1 \bar{y}$	$x_2 \bar{y}$	$x_3 \bar{y}$	$x_1 x_2 \bar{y}$	$x_1 x_3 \bar{y}$	$x_2 x_3 \bar{y}$	\bar{y}
1	-23,6	-23,6	-23,6	+23,6	+23,6	+23,6	23,6
2	+30,4	-30,4	-30,4	-30,4	-30,4	+30,4	30,4
3	-31,7	+31,7	-31,7	-31,7	+31,7	-31,7	31,7
4	+40,3	+40,3	-40,3	+40,3	-40,3	-40,3	40,3
5	-28,5	-28,5	+28,5	+28,5	-28,5	-28,5	28,5
6	+32,2	-32,2	+32,2	-32,2	+32,2	-32,2	32,2
7	-26,8	+26,8	+26,8	-26,8	-26,8	+26,8	26,8
8	+30,5	+30,5	+30,5	+30,5	+30,5	+30,5	30,5
9	0	0	0	0	0	0	-
$\sum_{n=1}^N$	22,8	14,6	-8	1,8	-8	-21,4	244
b_{ij}	$b_1=2,85$	$b_2=1,83$	$b_3=-1$	$b_{12}=0,23$	$b_{13}=-1$	$b_{23}=-2,68$	$b_0=30,5$

Перед началом вычислений обратим еще раз внимание на таблицу 5. Каждая строка таблицы заполнена одними и теми же числами. Так, в первой строке везде проставлено число 23,6, во второй 30,4 и т.д. Однако знаки при этих числах разные, они меняются в соответствии с правилом чередования знаков расчетных матриц. Отмеченную особенность составления вспомогательных таблиц для расчета коэффициентов необходимо уяснить начинающим исследователям именно сейчас, иначе в последующем смысл расчетов останется непонятным.

После составления расчетной матрицы для примера 1 суммируем числа в столбцах с учетом знаков и заполняем строку для сумм. Для расчета коэффициентов уравнения регрессии в плане ПФЭ достаточно разделить суммы соответствующих столбцов на число опытов N . В нашем случае $N = 8$. Тогда значение коэффициента b_0 определится как частное от деления суммы чисел столбца \bar{Y} на 8, то есть

$$b_0 = \frac{\sum_{n=1}^8 \bar{y}_n}{8} = \frac{244}{8} = 30,5.$$

Аналогично значения коэффициентов $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ можно определить делением сумм столбцов $\bar{x}_1 \bar{y}, \bar{x}_2 \bar{y}$ и т.д. на восемь:

$$b_1 = \frac{\sum_{n=1}^8 x_{1n} \bar{y}_n}{8} = \frac{22,8}{8} = 2,85; \quad b_2 = \frac{14,6}{8} = 1,83;$$

$$b_3 = \frac{-8}{8} = -1; \quad b_{12} = 0,23; \quad b_{13} = -1; \quad b_{23} = -2,68.$$

В общем случае для расчета коэффициентов в плане ПФЭ можно предложить следующие расчетные формулы:

$$b_0 = \frac{\sum_{n=1}^N \bar{y}_n}{N}; \quad b_i = \frac{\sum_{n=1}^N x_{in} \bar{y}_n}{N}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^N x_{in} x_{jn} \bar{y}_n}{N}. \quad (14)$$

Таким образом, все коэффициенты в уравнении регрессии (7), кроме коэффициента b_{123} , характеризующего взаимодействие второго порядка, мы рассчитали. Как видно, вычислительные трудности при определении коэффициентов в плане ПФЭ сведены до минимума, что стало возможным благодаря особому расположению опытных точек в факторном пространстве, а именно благодаря ортогонализации плана.

Описанная процедура расчетов известна как **метод наименьших квадратов**. В последующем мы будем пользоваться этим методом всегда, поэтому необходимо его хорошо запомнить.

Уравнение регрессии с рассчитанными коэффициентами для примера 1 будет выглядеть следующим образом:

$$y = 30,5 + 2,85x_1 + 1,83x_2 - x_3 + 0,23x_1x_2 - x_1x_3 - 2,68x_2x_3. \quad (15)$$

По абсолютному значению коэффициентов мы будем судить в дальнейшем о силе влияния того или иного фактора на протекание процесса. Так, по нашим данным, наиболее сильное влияние на выход продукта в выбранных пределах изменения переменных оказывает температура. С увеличением температуры выход продукта будет увеличиваться (знак при x_1 положительный), с увеличением давления – уменьшаться (знак при x_3 отрицательный). Вместе с тем **значимость влияния коэффициента** при двойном взаимодействии x_1x_2 заранее можно поставить под сомнение, так как по абсолютному значению этот коэффициент существенно меньше остальных. Процедура определения **значимости коэффициентов** формализована и является частью регрессионного анализа.

Вычисление значимости коэффициентов начинают с определения их дисперсий S_i^2, S_{ij}^2 :

$$S_i^2 = S_{ij}^2 = \frac{S^2}{N}, \quad (16)$$

где S^2 – уже известная нам дисперсия воспроизводимости выходного параметра. Для нашего примера $S^2 = 0,131$ (см. выше). Тогда $S_i^2 = S_{ij}^2 = \frac{0,131}{8} = 0,016$.

В планах ПФЭ дисперсии коэффициентов при линейных членах и коэффициенты, характеризующие взаимодействия различных порядков, равны, что значительно упрощает процедуру оценки их значимости.

Коэффициенты b_i, b_{ij} считаются значимыми, если

$$|b_i, b_{ij}| \geq t_{кр} \sqrt{S_i^2}, \quad (17)$$

где $t_{кр}$ – критическое значение **распределения (критерия) Стьюдента** для заданного уровня значимости α и f_2 степеней свободы. Критерий $t_{кр}$ находится с помощью таблиц (табл. 26).

В анализируемом примере $f_2 = 8$. Для уровня значимости $\alpha = 0,05$ $t_{кр} = 2,31$. Тогда $t_{кр} \sqrt{S_i^2} = 2,31 \sqrt{0,016} = 0,30$. Все коэффициенты в уравнении регрессии (15), превышающие 0,30, являются значимыми, и мы оставляем их для проверки адекватности полученной модели. Коэффициенты, которые меньше 0,30, считаются сравнимыми с ошибкой опыта, и мы вынуждены исключить их из уравнения. Таким образом, наши предположения подтвердились: действительно оказалось, что коэффициент при x_1x_2 незначим.

С учетом значимости коэффициентов уравнение регрессии будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 30,5 + 2,85x_1 + 1,83x_2 - x_3 - x_1x_3 - 2,68x_2x_3. \quad (18)$$

Это уравнение необходимо проверить на адекватность, то есть провести исследование, насколько точно оно описывает опытные данные. Проверку уравнения на адекватность проводят, как уже отмечалось выше, с помощью критерия Фишера:

$$F = \frac{S_D / f_1}{S_E / f_2} = \frac{S_{ад}^2}{S_{воспр}^2}.$$

В приведенном уравнении неопределенными пока являются сумма квадратов S_D и число степеней свободы при ней f_1 , которые и предстоит нам рассчитать.

Следует отметить, что корректное использование центрального распределения (критерия) Фишера возможно только в случае, если, во-первых, математическая модель тождественна истинной функции отклика и, во-вторых, систематические погрешности отсутствуют. Таким образом, процедура оценки адекватности, основанная на использовании центрального распределения Фишера, не совсем корректно отражает ситуацию, присущую оценке адекватности моделей функции отклика. Более уместным в этой процедуре является использование нецентральных распределений χ^2 и Фишера. Именно их желательно использовать при проверке гипотезы на адекватность полученных моделей.

Предположим, что для нашего случая имеет место нормальное распределение критерия Фишера с нулевым математическим ожиданием. Если отношение дисперсий не превышает $F_{кр}$, то нет оснований отвергать гипотезу о том, что модель верна. В этом случае говорят, что выбранная модель не противоречит данным эксперимента или что **модель адекватна**. В противном случае модель называют **неадекватной**.

Для проведения необходимых вычислений воспользуемся опять расчетной матрицей при условии, что столбец x_1x_2 будет исключен из анализа. В дальнейшем будем исключать из анализа все столбцы линейных эффектов и эффектов взаимодействий, коэффициенты при которых окажутся незначимыми.

Столбцы x_1 , x_2 и т.д. в расчетной матрице заполним произведениями кодированных значений факторов и их взаимодействий на соответствующие значения коэффициентов при них. Тогда абсолютные значения чисел в каждом из столбцов будут отличаться лишь знаками, причем для положительных коэффициентов знаки чисел в столбцах будут чередоваться по описанному выше правилу. Для отрицательных коэффициентов все знаки поменяются на противоположные, так как знак « $-$ » в матрице на « $-$ » при коэффициенте даст « $+$ », а « $+$ » на « $-$ » даст « $-$ » (табл. 6).

Таблица 6

№ П/П	b_0x_0	b_1x_1	b_2x_2	b_3x_3	$b_{13}x_1x_3$	$b_{23}x_2x_3$	\hat{y}_n	\bar{y}_n	$(\hat{y}_n - \bar{y}_n)^2$
1	30,5	-2,85	-1,83	+1	-1	-2,68	23,1	23,6	0,25
2	30,5	+2,85	-1,83	+1	+1	-2,68	30,8	30,4	0,16
3	30,5	-2,85	+1,83	+1	-1	+2,68	32,2	31,7	0,25
4	30,5	+2,85	+1,83	+1	+1	+2,68	39,9	40,3	0,16
5	30,5	-2,85	-1,83	-1	+1	+2,68	28,5	28,5	0
6	30,5	+2,85	-1,83	-1	-1	+2,68	32,2	32,2	0
7	30,5	-2,85	+1,83	-1	+1	-2,68	26,8	26,8	0
8	30,5	+2,85	+1,83	-1	-1	-2,68	30,5	30,5	0
									$S_R = 0,82$

Просуммировав построчно значения чисел в таблице 6, мы получим расчетные значения выходного параметра \hat{y}_n .

Для расчета S_D построчно определяем разность $\hat{y}_n - \bar{y}_n$ и возводим ее в квадрат. Остаточная сумма квадратов S_R рассчитывается как сумма квадратов разности \hat{y}_n и \bar{y}_n , то есть

$$S_R = \sum_{n=1}^N (\hat{y}_n - \bar{y}_n)^2. \quad (19)$$

Тогда $S_D = \gamma S_R$.

В нашем случае $S_R = 0,25 + 0,16 + 0,25 + 0,16 + 0 + 0 + 0 + 0 = 0,82$. Остается вычислить число степеней свободы f_1 , необходимое для расчета дисперсии адекватности. Данная величина в планах ПФЭ всегда определяется следующим образом:

$$f_1 = N - q, \quad (20)$$

где N – число опытов;

q – число значимых коэффициентов с учетом свободного члена b_0 ;

$$f_1 = 8 - 6 = 2.$$

Вычисляем значение критерия Фишера

$$F = \frac{2 \cdot 0,82 / 2}{2,10 / 8} = 3,12 < F_{кр} = 5,32.$$

Значение $F_{кр}$ для заданного уровня значимости α (принимая $\alpha = 0,05$) и $f_1 = 2$, а $f_2 = 8$ находим из таблиц (табл. 27).

Так как расчетное значение критерия Фишера не превосходит критическое, найденное по таблице, высказанное ранее предположение о надежности (адекватности) полученного уравнения не отвергается.

Но вернемся к таблице 6 и попытаемся уяснить сущность произведенных нами вычислений. По существу, мы подставили в уравнение (18) построчные значения x_i и $x_i x_j$ расчетной матрицы (табл. 3), то есть соответствующие данному опыту значения факторов варьирования в кодированной форме. Так, для первой строки $x_1 = -1$; $x_2 = -1$; $x_3 = -1$; $x_1 x_3 = 1$; $x_2 x_3 = 1$. Подставив эти значения в уравнение (18), получим

$$\begin{aligned} \hat{y} &= 30,5 + 2,85 \cdot (-1) + 1,83 \cdot (-1) - 1(-1) - 1 \cdot 1 - 2,68 \cdot 1 = \\ &= 30,5 - 2,85 - 1,83 + 1 - 1 - 2,68 = 23,1 \end{aligned}$$

Все расчеты, подобные этому, мы свели в таблицу. Пользование таблицей значительно упростило процедуру вычислений и до минимума свело вероятность ошибки.

Описанная последовательность вычислений применяется в большинстве планов, предназначенных для получения математического описания. С учетом изложенного эта последовательность включает следующие операции:

1. Рассчитываем среднее значение выходного параметра \bar{y}_n .
2. Определяем построчные дисперсии.
3. Вычисляем сумму квадратов S_E .
4. Рассчитываем дисперсию воспроизводимости ошибок наблюдений.
5. Проверяем воспроизводимость опытов по критерию Кохрена.
6. Вычисляем коэффициенты в уравнении регрессии.
7. Определяем дисперсии вычисленных коэффициентов.
8. Оцениваем значимость коэффициентов регрессии.
9. В строчках расчетной матрицы определяем значения выходного параметра с учетом значимых коэффициентов.
10. Рассчитываем сумму квадратов отклонений S_R и число степеней свободы f_1 .
11. Проверяем гипотезу об адекватности модели.

Если уравнение получилось адекватным, возможны два решения:

- 1) ограничиться полученной моделью и прекратить исследование;
- 2) оптимизировать процесс, основываясь на полученных данных.

Если оценка F -критерия указывает на неадекватность эмпирически вычисленной модели, количество возможных решений существенно возрастает. Однако в любом случае имеет смысл провести проверку на значимость квадратичных эффектов, то есть на значимость коэффициентов при x_i^2 . Для проверки предположения о значимости этих коэффициентов можно воспользоваться соотношением

$$|\bar{y}_0 - b_0| \leq t_{кр} S \sqrt{\frac{n_0 + \gamma N}{n_0 N}}, \quad (21)$$

где \bar{y}_0 – среднее арифметическое значение выходного параметра в центре плана при $x_1 = x_2 = \dots = x_k = 0$, полученное по экспериментальным данным;

b_0 – значение свободного члена в уравнении регрессии;

$t_{кр}$ – критическое значение распределения Стьюдента при выбранном уровне значимости α и числе степеней свободы f_2 ;

S – значение среднеквадратичной ошибки наблюдений, равное корню квадратному из S_2 ;

n_0 – число опытов в центре плана;

γ – количество параллельных опытов в точках плана;

N – число опытов в точках плана, не считая центральных.

В качестве примера проверим на значимость квадратичных эффектов уравнение (2.15). Для этого необходима постановка специальных опытов в центре плана, то есть в условиях нулевого уровня.

Так как эти опыты нами уже реализованы (табл. 4, опыт 9), проверка на значимость коэффициентов при квадратичных членах представляет собой элементарную арифметическую процедуру. В описанном примере $\bar{y}_0 = 30,9$; $b_0 = 30,5$; $t_{кр} (\alpha = 0,05; f_2 = 8) = 2,31$; $S = \sqrt{0,131} = 0,36$; $n_0 = 2$; $\gamma = 2$; $N = 8$. Тогда

$$2,31 \cdot 0,36 \sqrt{\frac{2 + 2 \cdot 8}{2 \cdot 8}} = 0,88 > |30,9 - 30,5| = 0,4.$$

Отсюда следует, что разность $|\bar{y}_0 - b_0|$ незначимо отличается от нуля, и квадратичные члены в модель можно не включать. Таким образом, мы окончательно убеждаемся в правомочности полученного уравнения регрессии для описания процесса.

Построение планов ДФЭ. Сразу заметим, что применение планов ДФЭ бывает целесообразным при достаточно большом числе факторов, влияющих на процесс, во всяком случае при $k \geq 4$. Для построения плана ДФЭ используют расчетную матрицу ПФЭ с меньшим числом факторов, чем в исследуемом процессе. Так, при $k = 4$ можно использовать расчетную матрицу для $k = 3$. Если число независимых переменных равно 5, то можно воспользоваться матрицей для $k = 4$ или $k = 3$. Но обратимся к примеру. Пусть требуется составить план ДФЭ, если $k = 4$. Воспользуемся для построения расчетной матрицей для $k = 3$ (табл. 3). При этом один из столбцов, характеризующих эффекты взаимодействия факторов (столбцы 5,6,7 или 8), заменим на x_4 . Обычно заменяют взаимодействие высшего порядка на недостающий фактор. В нашем случае столбец $x_1x_2x_3$ представим как x_4 . Тогда матрица планирования для плана ДФЭ будет иметь вид, представленный в таблице 7. Составленный подобным образом план называют иногда **дробной репликой**, подразумевая при этом, что реализуется лишь часть плана ПФЭ.

Таблица 7

№ п/п	x_1	x_2	x_3	x_4
1	–	–	–	–
2	+	–	–	+
3	–	+	–	+
4	+	+	–	–
5	–	–	+	+
6	+	–	+	–
7	–	+	+	–
8	+	+	+	+

В таблице 7 в кодированной форме представлены условия проведения опытов для плана ДФЭ типа 2^{4-1} . Запись 2^{4-1} означает, что для числа факторов, равного четырем, составлен план ДФЭ на основе матрицы с числом факторов на единицу меньшим.

По сравнению с 2^4 опытами полного факторного плана полученный дробный план состоит из $2^{4-1} = 8$ опытов. Таким образом, преимущество дробных планов с точки зрения числа опытов очевидно. Составим расчетную матрицу для плана 2^{4-1} (табл. 8).

Таблица 8

№ п/п	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_1 x_4$	$x_2 x_3$	$x_2 x_4$	$x_3 x_4$
1	–	–	–	–	+	+	+	+	+	+
2	+	–	–	+	–	–	+	+	–	–
3	–	+	–	+	–	+	–	–	+	–
4	+	+	–	–	+	–	–	–	–	+
5	–	–	+	+	+	–	–	–	–	+
6	+	–	+	–	–	+	–	–	+	–
7	–	+	+	–	–	–	+	+	–	–
8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Расчетная матрица для планов ДФЭ составляется, как и в планах ПФЭ. Но обратим внимание на столбцы, характеризующие двойные взаимодействия. Порядок чередования знаков в столбце x_1x_2 аналогичен столбцу x_3x_4 , столбце x_1x_3 – столбцу x_2x_4 , столбце x_1x_4 – столбцу x_2x_3 . Вместе с тем выше было показано, что именно характером чередования знаков в столбцах определяется величина и знак коэффициентов при взаимодействиях. Если порядок чередования знаков одинаков, то и коэффициенты при взаимодействиях окажутся одинаковыми. Наблюдаемое свойство планов ДФЭ известно, как **эффект смешения**.

В соответствии с названным эффектом коэффициенты при взаимодействиях x_1x_3 и x_2x_4 , а также x_1x_4 и x_2x_3 и т.д. в составленном выше плане будут равны между собой и будут являться результирующей характеристикой соответственно двух пар взаимодействий. Поэтому подбирают дробную реплику таким образом, чтобы одно из взаимодействий, составляющих пару смешанных эффектов, было незначимым. Естественно, для выбора, какое из взаимодействий не должно проявиться при описании данного процесса, необходимо иметь некоторые предварительные сведения.

Условия смешения эффектов в матрице дробного факторного эксперимента задаются так называемым **генератором плана**². Генератор определяет, какое взаимодействие в матрице планирования заменено линейным эффектом.

$$x_4 = x_1x_2x_3. \quad (22)$$

Выражение (22) является генератором составленного нами плана ДФЭ. Умножив правую и левую части генератора на x_4 , получим

$$x_4^2 = x_1x_2x_3x_4.$$

Поскольку $x_4^2 = 1$ независимо от того, на каком уровне этот фактор находится, то есть +1 или –1, можно записать

$$1 = x_1x_2x_3x_4 \quad (23)$$

² Иногда генератор называют генерирующим соотношением.

Это выражение называется **определяющим контрастом**. С его помощью и выясняют характер смешения эффектов в матрице планирования. Для выяснения необходимо обе части определяющего контраста умножить на интересующий нас эффект. Например, для полуреплики (табл. 8) условия смешения следующие:

$$x_1 = x_1^2 x_2 x_3 x_4 = x_2 x_3 x_4;$$

$$x_2 = x_1 x_2^2 x_3 x_4 = x_1 x_3 x_4;$$

$$x_3 = x_1 x_2 x_3^2 x_4 = x_1 x_2 x_4;$$

$$x_4 = x_1 x_2 x_3 x_4^2 = x_1 x_2 x_3;$$

$$x_1 x_2 = x_1^2 x_2^2 x_3 x_4 = x_3 x_4;$$

$$x_1 x_3 = x_1^2 x_2 x_3^2 x_4 = x_2 x_4;$$

$$x_1 x_4 = x_1^2 x_2 x_3 x_4^2 = x_2 x_3.$$

Коэффициенты при линейных членах в нашем случае будут смешаны с коэффициентами при взаимодействиях второго порядка (при тройных взаимодействиях), коэффициенты при двойных взаимодействиях попарно смешаны друг с другом. Но так как коэффициенты при взаимодействиях второго и более высоких порядков мы условились считать незначимыми, можно предположить, что коэффициенты при линейных эффектах определяются независимо. Последний вывод весьма важен, так как определяет свойство планов ДФЭ типа 2^{k-1} , в которых взаимодействие высшего порядка заменено линейным эффектом, то есть в которых генератором является соотношение $x_k = x_1 x_2 \dots x_{k-1}$. В качестве генератора можно было выбрать и другое соотношение, связывающее x_4 с любым из двойных взаимодействий. Таким образом, могли иметь место равенства: $x_4 = x_1 x_2$; $x_4 = x_1 x_3$; $x_4 = x_2 x_3$ или $x_4 = -x_1 x_2$; $x_4 = -x_1 x_3$; $x_4 = -x_2 x_3$. Эффекты смешения в каждом конкретном случае будут разными.

С наибольшим эффектом дробные реплики можно применять при возможности описания процесса линейной моделью. Если мы сомневаемся в значимости каких-либо двойных (попарно смешанных) взаимодействий, подобные планы лучше не применять, так как в последующем мы обязательно усомнимся в истинности полученного уравнения. Но если план реализован, коэффициенты сосчитаны и проверены на значимость, а сомнение не проходит, можно порекомендовать единственный правильный выход: достроить дробную реплику до полного факторного плана и оценить эти коэффициенты. Достроить план – значит включить в него опытные точки, недостающие до плана ПФЭ (или плана ДФЭ более высокой разрешающей способности). Например, мы хотим достроить до плана ПФЭ дробную реплику табл. 7. В таком случае мы должны включить в него опытные точки плана ДФЭ 2^{4-1} с генератором $x^4 = -x_1 x_2 x_3$. Знак «минус» при $x_1 x_2 x_3$ означает, что в последующих восьми опытах, необходимых для составления плана 2^4 , знаки в столбце $x_4 = x_1 x_2 x_3$ будут

поочередно принимать значения, противоположные рассчитанным в плане с генератором $x_4 = x_1x_2x_3$. Результаты достройки плана представлены в табл. 9.

Таблица 9

№ п/п	x_1	x_2	x_3	x_4
1	–	–	–	–
2	+	–	–	+
3	–	+	–	+
4	+	+	–	–
5	–	–	+	+
6	+	–	+	–
7	–	+	+	–
8	+	+	+	+
9	–	–	–	+
10	+	–	–	–
11	–	+	–	–
12	+	+	–	+
13	–	–	+	–
14	+	–	+	+
15	–	+	+	+
16	+	+	+	–

Как видим, порядок чередования знаков в столбцах x_1 , x_2 , x_3 не противоречит выведенному выше правилу чередования знаков в планах ПФЭ. В столбце x_4 в первых восьми опытах знаки чередуются, как и в таблице 7. Начиная с 9-й строки (с 9-го опыта), мы поочередно проставляем знаки, противоположные имеющимся в таблице 7, считая от первого опыта. Так, в девятом опыте мы проставляем в столбце для x_4 знак «+», так как в первом опыте стоит знак «–». В десятом ставим «–», так как во втором стоит «+» и т.д. до 16-го опыта.

Расчет планов ДФЭ. Последовательность и характер вычислений в планах ДФЭ в большинстве случаев ничем не отличаются от расчетов, рассмотренных выше в планах ПФЭ. Основными отличительными особенностями являются необходимость определения характера смещения коэффициентов и некоторые ограничения в проверке полученных уравнений на адекватность при наличии значимых взаимодействий.

Пример 2. Предварительным исследованием было установлено, что на выход продукта C по реакции, протекающей в жидкой фазе в среде инертного растворителя, влияют следующие факторы: x_1 – концентрация компонента B , не участвующего в реакции; x_2 – температура в реакторе; x_3 – продолжительность процесса; x_4 – жидкостный модуль (растворитель: масса компонента A).

Требуется экспериментальным путем найти интерполяционное уравнение, с помощью которого можно было бы описать зависимость выхода продукта C от перечисленных выше четырех факторов и их парных взаимодействий x_2x_3 и x_3x_4 . Влияние остальных взаимодействий на выход указанного продукта предполагалось несущественным. Значит, интересующее нас уравнение должно выглядеть

следующим образом:

$$\hat{y} = \hat{b}_0 + \hat{b}_1x_1 + \hat{b}_2x_2 + \hat{b}_3x_3 + \hat{b}_4x_4 + \hat{b}_{23}x_2x_3 + \hat{b}_{34}x_3x_4. \quad (24)$$

В таблицы 10 представлены уровни факторов и их интервалы варьирования.

Исходя из соображений, изложенных выше, для построения модели выбрали дробный факторный план типа 2^{4-1} с генератором $x^4 = x_1x_2$. Контрастом для этого плана является соотношение $1 = x_1x_2x_4$.

Коэффициенты смешаны при этом следующим образом:

Таблица 10

Фактор	x_i	Δx_i	Уровень фактора		
			-1	0	+1
Концентрация компонента B, %	x_1	0,5	1,5	2,0	2,5
Температура в реакторе, °C	x_2	50	200	250	300
Продолжительность процесса, мин	x_3	5	35	40	45
Жидкостный модуль	x_4	10	40	50	60

$$\begin{aligned} \hat{b}_1 &\rightarrow b_1 + b_{24}; & \hat{b}_2 &\rightarrow b_2 + b_{14}; & \hat{b}_3 &\rightarrow b_3; & \hat{b}_4 &\rightarrow b_4 + b_{12}; \\ \hat{b}_{34} &\rightarrow b_{123}; & \hat{b}_{13} &\rightarrow b_{234}; & \hat{b}_{23} &\rightarrow b_{134}, \end{aligned}$$

где b_i, b_{ij} – значения коэффициентов уравнения регрессии, рассчитанных в соответствии с составленной расчетной матрицей плана ДФЭ.

Обратим внимание на характер смешения коэффициентов. Оказывается, что коэффициенты $\hat{b}_{34}, \hat{b}_{13}, \hat{b}_{23}$, рассчитанные по выбранному плану ДФЭ, смешаны лишь с тройными взаимодействиями, значит, можно считать, что определяются независимо. Из этих коэффициентов \hat{b}_{34} и \hat{b}_{23} , по нашим предположениям, должны быть значимыми. Из линейных эффектов независимо определяется лишь коэффициент \hat{b}_3 . Остальные коэффициенты при линейных членах смешаны с коэффициентами при двойных взаимодействиях. Однако мы заранее условились, что все взаимодействия (кроме x_2x_3 и x_3x_4), определяющие в данном случае характер смешения линейных эффектов, незначимо влияют на процесс и выход продукта, т.е. ими можно пренебречь. Таким образом, можно считать, что все интересующие нас коэффициенты определяются независимо, так как одни из них смешаны с тройными взаимодействиями, другие – с двойными, не оказывающими влияния на выход продукта. Отмеченные свойства составляемого плана стали возможными в результате удачного выбора генератора. Подбирая соответствующим образом генератор, можно получить разные сочетания эффектов смешения. Из них в большинстве случаев можно получить удовлетворяющие нас сочетания.

Составим расчетную матрицу для плана ДФЭ типа 2^{4-1} с генератором $x_4 = x_1x_2$ (табл. 11).

В таблице 11 приведены результаты экспериментального исследования процесса в соответствии с выбранным планом. Так же как и в планах ПФЭ, значения y_1 и y_2 представляют собой данные параллельных опытов по выходу продукта C , \bar{y} – арифметическое среднее этих опытов.

Таблица 11

№ П/П	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_2 x_3$	$x_3 x_4$	y_1	y_2	\bar{y}
1	–	–	–	+	+	–	53,2	54,6	53,9
2	+	–	–	–	+	+	30,1	28,3	29,2
3	–	+	–	–	–	+	38,8	37,8	38,3
4	+	+	–	+	–	–	22,4	24,0	23,2
5	–	–	+	+	–	+	22,9	24,9	23,9
6	+	–	+	–	+	–	12,6	11,8	12,2
7	–	+	+	–	–	–	58,0	59,2	58,6
8	+	+	+	+	+	+	30,3	28,9	29,6
9							34,6	35,4	35,0

Порядок расчета при анализе опытных данных плана ДФЭ аналогичен введенной выше последовательности вычислений для плана ПФЭ.

1. По результатам параллельных опытов рассчитываем S_E :

$$S_E = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^{\gamma} (\bar{y}_n - y_{ln})^2 = 2[(53,9 - 53,2)^2 + (29,2 - 30,1)^2 + \dots + (29,6 - 30,3)^2] = 8,4.$$

2. Оцениваем воспроизводимость опытов по критерию Кохрена:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{S_E} = \frac{1,00}{8,4} = 0,12 < 0,68 = G_{\text{кр}} \text{ при } \alpha = 0,05, \gamma - 1 = 1 \text{ и } N = 8.$$

Отсюда делаем вывод, что опытные данные таблицы 11 достаточно хорошо воспроизводятся.

3. Рассчитываем коэффициенты уравнения регрессии (24) по формулам (14), для чего заполняем строки расчетной матрицы (табл. 11) значениями $x_{in} \bar{y}_n$ и $x_{in} x_{jn} \bar{y}_n$ (табл. 12).

В нижней части таблицы приведены рассчитанные коэффициенты. Очевидно, что взаимодействия $x_2 x_3$ и $x_3 x_4$ действительно оказывают существенное влияние на целевую величину. Интерполяционное уравнение имеет вид:

$$y = 33,6 - 10,1x_1 + 3,8x_2 - 2,5x_3 - 1,0x_4 + 9,2x_2x_3 - 3,4x_3x_4. \quad (25)$$

Таблица 12

№ П/П	$\bar{x}_1 y$	$\bar{x}_2 y$	$\bar{x}_3 y$	$\bar{x}_4 y$	$\bar{x}_1 \bar{x}_3 y$	$\bar{x}_2 \bar{x}_3 y$	$\bar{x}_3 \bar{x}_4 y$	\bar{y}
1	-53,9	-53,9	-53,9	+53,9	+53,9	+53,9	-53,9	53,9
2	+29,2	-29,2	-29,2	-29,2	-29,2	+29,2	+29,2	29,2
3	-38,3	+38,3	-38,3	+38,3	+38,3	-38,3	+38,3	38,3
4	+23,2	+23,2	-23,2	-23,2	-23,2	-23,2	-23,2	23,2
5	-23,9	-23,9	+23,9	-23,9	-23,9	-23,9	+23,9	23,9
6	+12,2	-12,2	+12,2	+12,2	+12,2	-12,2	-12,2	12,2
7	-58,6	+58,6	+58,6	-58,6	-58,6	+58,6	-58,6	58,6
8	+29,6	+29,6	+29,6	+29,6	+29,6	+29,6	+29,6	29,6
$\sum_{n=1}^N$	-80,5	30,5	-20,9	-7,7	-0,9	73,7	-26,9	268,9
$b_i b_{ij}$	-10,1	3,8	2,5	-1,0	-1,0	9,2	-3,4	33,6

4. Проверяем значимость коэффициентов, принимая $\alpha = 0,05$. При $f_2 = 8$ $t_{кр} = 2,31$ (табл. 26). Тогда доверительный интервал для дисперсий коэффициентов

$$\delta = t_{кр} S_i = 2,31 \cdot 0,26 = 0,59,$$

где $S^2 = \frac{S_E}{\gamma N(\gamma - 1)} = 0,525$; $S_i = \sqrt{\frac{S^2}{N}} = \sqrt{\frac{0,525}{8}} = 0,26$.

Коэффициенты, которые по абсолютному значению меньше $\delta = 0,59$, мы должны исключить из уравнения.

Таким образом, сделанные выше предположения относительно значимости коэффициентов подтвердились. Все коэффициенты, включенные в интерполяционную формулу, оказались значимыми.

5. Рассчитаем по формуле (25) значения \hat{y} . Таким же образом, как и в плане ПФЭ, для составления таблицы воспользуемся расчетной матрицей нашего плана, столбцы которой заполним произведениями $b_i x_{in}$ и $b_{ij} x_{in} x_{jn}$ (табл. 13).

Таблица 13

b_0	$b_1 x_1$	$b_2 x_2$	$b_3 x_3$	$b_4 x_4$	$b_{23} x_2 x_3$	$b_{34} x_3 x_4$	\bar{y}_n	\hat{y}_n
33,6	+10,1	-3,8	+2,5	-1,0	+9,2	+3,4	53,9	54,0
33,6	-10,1	-3,8	+2,5	+1,0	+9,2	-3,4	29,2	39,0
33,6	+10,1	+3,8	+2,5	+1,0	-9,2	-3,4	38,3	38,4
33,6	-10,1	+3,8	+2,5	-1,0	-9,2	+3,4	23,2	23,0
33,6	+10,1	-3,8	-2,5	-1,0	-9,2	-3,4	23,9	23,8
33,6	-10,1	-3,8	-2,5	+1,0	-9,2	+3,4	12,2	12,4
33,6	+10,1	+3,8	-2,5	+1,0	+9,2	+3,4	58,6	58,6
36,6	-10,1	+3,8	-2,5	-1,0	+9,2	-3,4	29,6	29,6

6. Расчет остаточной суммы квадратов проводим обычным методом:

$$S_R = \sum_{n=1}^N (\hat{y}_n - \bar{y}_n)^2.$$

Для нашего примера $S_R = 0,15$ (расчет не приводится). Число степеней свободы, связанное с неадекватностью модели,

$$f_1 = N - q = 8 - 7 = 1.$$

7. Проверим адекватность интерполяционной формулы (25) по критерию Фишера:

$$F = \frac{2 \cdot S_R / f_1}{S_E / f_2} = \frac{2 \cdot 0,15 / 1}{8,14 / 8} = 0,285 < F_{0,05} = 5,3.$$

Табличное значение F -критерия значительно превосходит полученное из сравнения дисперсий по F -отношению, значит, уравнение регрессии адекватно эксперименту, и его можно рекомендовать в качестве интерполяционной формулы в области планирования.

8. Проверим значимость квадратичных членов в уравнении (25) по формуле (21). В нашем случае $\gamma = 2$; $S^2 = 0,525$, $n_0 = 2$; $N = 8$; $f_2 = 8$, $b_0 = 35,0$ (табл. 11, опыт 9). Тогда

$$|\bar{y}_0 - b_0| = |35,0 - 33,6| = 1,4 < 2,31 \cdot 0,72 \sqrt{\frac{2+16}{16}} = 1,76.$$

Отсюда следует, что разность $|\bar{y}_0 - b_0|$ незначимо отличается от нуля и квадратичные члены в модель можно не вводить.

Таким образом, проведенное исследование показало, что действительно на выход продукта C оказывают влияние выбранные параметры. Из них компонент B , очевидно, является ингибитором реакции, значит, процесс желательно вести при отсутствии данного компонента.

Описанные выше планы первого порядка (планы ПФЭ и ДФЭ) можно использовать далеко не всегда. Если в результате предварительного исследования или некоторых априорных сведений сделан вывод о значимости квадратичных эффектов в уравнении регрессии, для описания процесса необходимо реализовать план второго или даже более высокого порядков. Ниже будут рассмотрены особенности построения и расчета некоторых из указанных планов, а именно композиционные планы, построенные на планах ПФЭ и ДФЭ, а также симплекс-планы.

6.3. Планы второго порядка

Для оценки (расчета) коэффициентов в уравнении регрессии, содержащих квадратичные эффекты, независимая переменная в плане должна принимать, по крайней мере, три различных значения, то есть должна изменяться минимум как на трех уровнях. Напомним, что при постановке планов ПФЭ и ДФЭ факторы варьировали только на двух уровнях. Простейшим решением в данном

случае хочется назвать планирование типа 3^k , но это неверно, так как реализация подобного решения приводит к необходимости постановки неоправданно большого числа опытов, если $k > 3$.

Композиционный план для квадратичных моделей может быть получен путем добавления некоторого количества специальных точек к «ядру», образованному планами ПФЭ или ДФЭ. Полином, используемый для описания процесса в планах второго порядка, имеет следующий вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{kk}x_k^2 + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{ij}x_ix_j. \quad (26)$$

На рисунке 3, показаны точки композиционных планов для $k = 2$ и $k = 3$. Здесь в качестве ядра использованы точки полного факторного эксперимента (обозначены кружками). Квадратиками обозначены звездные точки, расположенные на координатных осях на расстоянии α от центра плана. Выбором величины плеча α и числа n_0 точек в центре композиционных планов могут быть обеспечены различные их свойства.

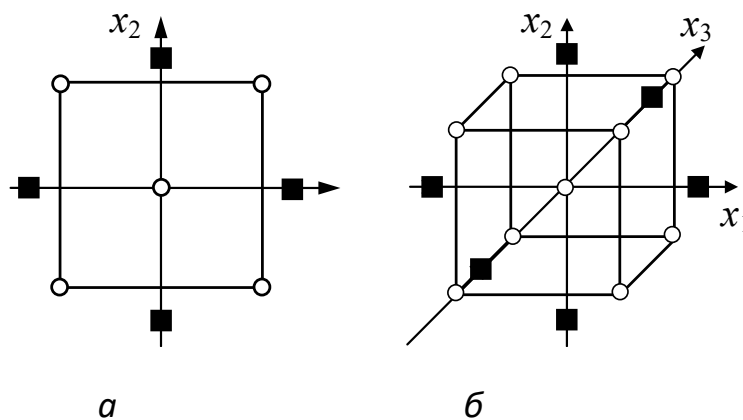


Рисунок 3 – Геометрическое представление опытных точек в композиционных планах второго порядка: а – для $k = 2$; б – для $k = 3$

Построение и расчет ортогональных композиционных планов. При построении этих планов значение α (плечо звездных точек) выбирается так, чтобы добиться **ортогональности** полученного плана. Число точек в центре плана обычно принимается равным единице.

Для примера построим ортогональный план второго порядка для трех факторов. За основу примем план ПФЭ для трех факторов, построенный выше (табл. 3).

Как видно из таблицы 14, матрица планирования нужного нам плана включает опытные точки на трех уровнях: в ядре плана ПФЭ, звездные точки (α), в центре плана.

Характер расположения звездных точек в матрице ясен из таблицы. При необходимости построения матрицы для большего числа факторов описанная процедура аналогична. За основу берем план или ДФЭ для числа факторов k и к нему пристраиваем $2k$ звездных точек и один опыт в центре плана.

Таблица 14

Уровни опытных точек	№п/п	x_1	x_2	x_3
Ядро плана	1	–	–	–
	2	+	–	–
	3	–	+	–
	4	+	+	–
	5	–	–	+
	6	+	–	+
	7	–	+	+
	8	+	+	+
Звездные точки	9	$-\alpha$	0	0
	10	$+\alpha$	0	0
	11	0	$-\alpha$	0
	12	0	$+\alpha$	0
	13	0	0	$-\alpha$
	14	0	0	$+\alpha$
Центр плана	15	0	0	0

Значение плеча α зависит в первую очередь от числа факторов (табл. 15). В таблице представлены также значения других констант, необходимых для расчета обсуждаемых планов.

Таблица 15

Ядро плана	N	α	β	c_0	c_1	c_2	c_3
2^2	9	1	0,6667	0,1111	0,1667	0,5	0,25
2^3	15	1,215	0,73	0,0667	0,0913	0,2298	0,125
2^4	25	1,414	0,80	0,0400	0,0500	0,1250	0,0625
2^{5-1}	27	1,547	0,77	0,0370	0,0481	0,0871	0,0625
2^{6-1}	45	1,722	0,843	0,0222	0,0264	0,0564	0,03125
2^{7-1}	79	1,885	0,90	0,0127	0,0141	0,0389	0,0156
2^{8-2}	81	2,001	0,8889	0,0123	0,0139	0,0312	0,0156

При $k \leq 4$ в качестве ядра ортогонального композиционного центрального плана может быть использован только план ПФЭ. Для $k = 5$ в качестве ядра можно использовать дробный план с генератором $x_5 = x_1x_2x_3x_4$, для k , равного 6 или 7, также возможно применение только планов 2^{k-1} . Лишь для $k = 8$ применяются в качестве ядра планы 2^{8-2} .

Матрица планирования (табл. 14) служит основой, определяющей условия реализации опытов ($N = 15$), а также основной для построения расчетной матрицы. Для обеспечения ортогональности расчетной матрицы необходимо квадратичные переменные в модели (26) несколько преобразовать. Если значения x_i равны «–» или «+», то в колонке для x_i^2 мы всегда будем иметь «+», значит, ортогональность модели будет нарушена по причине неортогональности столбцов x_0 и x_i^2 . Поэтому при расчете коэффициентов

регрессии в столбец x_i^2 расчетной матрицы записывается преобразованная переменная, равная разности $(x_i^2 - \beta)$. Значение константы β в зависимости от размерности плана приведено в табл. 15.

Уравнение регрессии, определяемое по ортогональному плану второго порядка, принимает следующий вид:

$$y = a_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + b_{11}(x_1^2 - \beta) + \dots + b_{kk}(x_k^2 - \beta) + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{ij}x_ix_j. \quad (27)$$

От модели (2.24) легко перейти к модели (2.23), определяя b_0 следующим образом:

$$b_0 = a_0 - \beta \sum_{i=1}^k b_{ii}. \quad (28)$$

Расчетная матрица для $k = 3$ представлена в таблице 16. Значения констант $\alpha = 1,215$ и $\beta = 0,73$ при составлении расчетной матрицы находим из таблицы 15. Аналогично можно составить матрицу для любого количества факторов. Колонки x_ix_j заполняются в полном соответствии с планом ПФЭ. Характер заполнения колонок $x_i^2 - \beta$ ясен из табл. 16.

Для выяснения последовательности и смысла расчетов в ортогональном плане второго порядка обратимся к конкретному примеру. Сразу заметим, что опыты в данных планах принято дублировать, так же как и в планах ПФЭ и ДФЭ.

Таблица 16

№ п/п	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1^2 - \beta$	$x_2^2 - \beta$	$x_3^2 - \beta$	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3
1	+	-	-	-	0,27	0,27	0,27	+	+	+
2	+	+	-	-	0,27	0,27	0,27	-	-	+
3	+	-	+	-	0,27	0,27	0,27	-	+	-
4	+	+	+	-	0,27	0,27	0,27	+	-	-
5	+	-	-	+	0,27	0,27	0,27	+	-	-
6	+	+	-	+	0,27	0,27	0,27	-	+	-
7	+	-	+	+	0,27	0,27	0,27	-	-	+
8	+	+	+	+	0,27	0,27	0,27	+	+	+
9	+	-1,215	0	0	0,75	-0,73	-0,73	0	0	0
10	+	1,215	0	0	0,75	-0,73	-0,73	0	0	0
11	+	0	-1,215	0	-0,73	0,75	-0,73	0	0	0
12	+	0	1,215	0	-0,73	0,75	-0,73	0	0	0
13	+	0	0	-1,215	-0,73	-0,73	0,75	0	0	0
14	+	0	0	1,215	-0,73	-0,73	0,75	0	0	0
15	+	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	0	0	0

Пример 3. На выход масел при разгонке смолы оказывают влияние: температура процесса, скорость нагрева до заданной температуры и продолжительность изотермической выдержки. Требуется найти математическую зависимость, связывающую выход продукта с названными параметрами.

Ранее было установлено, что линейной модели для описания данного процесса недостаточно. Проверка полученных ранее данных по уравнению (21) показала, что в модель требуется включить квадратичные члены. Для получения необходимого описания решено было использовать ортогональный композиционный план второго порядка. Условия опытов иллюстрирует таблица 17.

Так как значение звездного плеча α в плане для трех факторов равно 1,215, уровень $-\alpha$ в табл. 17 равен для температуры $500 - (1,215 \cdot 25) = 369,6$ °С. Уровень $+\alpha$ соответственно определится как $500 + (1,215 \cdot 25) = 530,4$ °С. Для остальных факторов расчет аналогичен.

Таблица 17

Фактор	Кодир. обозначение	Δx_i	$-\alpha$	$-$	0	$+$	$+\alpha$
Температура, °С	x_1	25	269,6	275	300	325	330,4
Скорость нагрева, °С/мин	x_2	1	5,785	6	7	8	8,215
Продолжительность изометрической выдержки, мин	x_3	30	143,55	150	180	210	216,45

Результаты опытов примера 3 с учетом условий их реализации, определенных табл. 17, представлены в табл. 18.

Таблица 18

№ п/п	$\bar{x}_1 y$	$\bar{x}_2 y$	$\bar{x}_3 y$	$\bar{x}_1 \bar{x}_2 y$	$\bar{x}_1 \bar{x}_3 y$	$\bar{x}_2 \bar{x}_3 y$	$(x_1^2 - \beta) \bar{y}$	$(x_2^2 - \beta) \bar{y}$	$(x_3^2 - \beta) \bar{y}$	\bar{y}_n
1	-25	-25	-25	+25	+25	+25	6,75	6,75	6,75	25,0
2	+29	-29	-29	-29	-29	+29	7,83	7,83	7,83	29,0
3	-21	+21	-21	+21	+21	-21	5,67	5,67	5,67	21,0
4	+21	+21	-21	-21	-21	-21	5,67	5,67	5,67	21,0
5	-27	-27	+27	-27	-27	-27	7,29	7,29	7,29	27,0
6	+31	-31	+31	+31	+31	-31	8,37	8,37	8,37	31,0
7	-27	+27	+27	-27	-27	+27	7,29	7,29	7,29	27,0
8	+27	+27	+27	+27	+27	+27	7,29	7,29	7,29	27,0
9	-23,4	0	0	0	0	0	14,48	-14,09	-14,09	19,3
10	+23,4	0	0	0	0	0	16,28	-15,84	-15,84	21,7
11	0	-33,3	0	0	0	0	-20,00	20,55	-20,00	27,4
12	0	+27,3	0	0	0	0	-16,43	16,88	-16,43	22,5
13	0	0	-21,9	0	0	0	-17,52	-17,52	18,00	24,0
14	0	0	+35,1	0	0	0	-21,10	-21,10	21,68	28,9
15	0	0	0	0	0	0	-16,06	-16,06	-16,06	22,0
$\sum_{n=1}^{15}$	11,0	-22,0	21,9	-8	0	8	-4,19	8,98	13,51	376,0
b_i	1,04	-2,09	2,0	-1	0	1	-0,96	2,06	3,10	25,07

Вычисления, связанные с определением S_E , аналогичны принятым в планах ПФЭ и ДФЭ, поэтому здесь они опускаются. В таблице 18 данные, характеризующие выход продукта, представляют собой средние значения двух параллельных опытов. После соответствующих расчетов значение суммы квадратов ошибок S_E оказалось равным 5,85.

Проверка воспроизводимости опытов по критерию Кохрена (соотношение (13)) показала, что при уровне значимости $\alpha = 0,05^3$ и числе степеней свободы $f_2 = N(\gamma-1)$ опыты достаточно хорошо воспроизводимы.

Убедившись, что опытные данные хорошо воспроизводятся, приступаем к расчету коэффициентов уравнения регрессии:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3.$$

Для расчета, так же как и в предыдущих ортогональных планах, воспользуемся расчетной матрицей для трех факторов (табл. 16). Заполним строки этой матрицы произведениями выходного параметра \bar{y}_n на соответствующие кодированные значения x_{in} , $x_{in}x_{jn}$ и $x_{in}^2 - \beta$. Как и в планах ПФЭ и ДФЭ, после заполнения расчетной матрицы соответствующими произведениями (табл. 18) определим суммы чисел по столбцам с учетом их знаков.

Расчитанные суммы произведений элементов матрицы приведены внизу таблицы. Коэффициенты уравнения регрессии второго порядка для $k = 3$ определяем на основе вычисленных сумм. В общем виде формулы для расчета коэффициентов выглядят следующим образом:

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \bar{y}_n; \quad (29)$$

$$b_i = c_1 \sum_{n=1}^N x_{in} \bar{y}_n; \quad (30)$$

$$b_{ii} = c_2 \sum_{n=1}^N (x_{in}^2 - \beta) \bar{y}_n; \quad (31)$$

$$b_{ij} = c_3 \sum_{n=1}^N x_{ijn} \bar{y}_n. \quad (32)$$

Значения коэффициентов c_1 , c_2 , c_3 приведены в табл. 15. Для нашего примера

$$\begin{aligned} b_1 &= 0,0913 \cdot 11,0 = 1,043; & b_2 &= -2,086; & b_3 &= 1,999; \\ b_{11} &= 0,2298 \cdot (-4,19) = -0,96; & b_{22} &= 2,06; & b_{33} &= 3,10; \\ b_{12} &= 0,125 \cdot (-8) = -1,0; & b_{13} &= 0,00; & b_{23} &= 1,0; \end{aligned}$$

³ Уровень значимости α , и звездное плечо α совершенно разные понятия, которые принято обозначать одинаковыми символами.

$$a_0 = \frac{1}{15} 376,0 = 25,07.$$

С учетом рассчитанных коэффициентов уравнение регрессии может быть записано следующим образом:

$$y = 25,07 + 1,04x_1 - 2,09x_2 + 2,00x_3 - 0,96(x_1^2 - 0,73) + 2,06(x_2^2 - 0,73) + 3,10(x_3^2 - 0,73) - x_1x_2 + x_2x_3. \quad (33)$$

Для перехода к обычной форме записи воспользуемся формулой (28):

$$b_0 = 25,07 - 0,73(-0,96 + 2,06 + 3,10) = 22,00.$$

Теперь уравнение регрессии можно записать в окончательном виде:

$$\hat{y} = 22,0 + 1,04x_1 - 2,09x_2 + 2,00x_3 - 0,96x_1^2 + 2,06x_2^2 + 3,10x_3^2 - x_1x_2 + x_2x_3. \quad (34)$$

Проверим значимость коэффициентов полученного уравнения. Сразу заметим, что их дисперсии отличаются по абсолютному значению и определяются для групп коэффициентов по формулам

$$S_0^2 = S^2(c_0 + \kappa\beta^2c_2), \quad (35)$$

$$S_{ii}^2 = S^2c_i; \quad S_{ij}^2 = S^2c_{ij}; \quad S_i^2 = S^2c_i. \quad (36)$$

Так как все опыты дублированы, дисперсию S_2 рассчитываем, используя ранее определенное значение суммы квадратов ошибок $S_E = 5,85$:

$$S^2 = \frac{S_E}{\gamma N(\gamma - 1)} = \frac{5,85}{2 \cdot 8} = 0,37.$$

Значения констант c_0, c_1, c_2, c_3 находим в табл. 15.

$$\begin{aligned} \text{Тогда } S_i^2 &= 0,37 \cdot 0,0913 = 0,03378; & S_i &= 0,184; \\ S_{ii}^2 &= 0,37 \cdot 0,2298 = 0,08503; & S_{ii} &= 0,292; \\ S_{ij}^2 &= 0,37 \cdot 0,1250 = 0,04625; & S_{ij} &= 0,215; \\ S_0^2 &= 0,37(0,0667 + 3 \cdot 0,73^2 \cdot 0,2298) = 0,1606; & S_0 &= 0,401. \end{aligned}$$

Значимость групп коэффициентов вычисляются в соответствии с изложенным выше методом (соотношение (17)), где $t_{кр} = 2,131$ для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и $f_2 = 15$ (табл. 26). Отсюда $\delta_i = 2,131 \cdot 0,184 = 0,39$; $\delta_{ii} = 2,131 \cdot 0,292 = 0,62$; $\delta_{ij} = 2,131 \cdot 0,215 = 0,46$; $\delta_0 = 2,131 \cdot 0,401 = 0,85$. Коэффициенты b_i при линейных членах, абсолютные значения которых меньше, чем $\delta_i = 0,39$, следует считать незначимыми. Аналогично значимые коэффициенты b_{ij} должны быть более 0,46, свободный член b_0 – более 0,85, а коэффициенты b_{ii} – более 0,62.

Таким образом, все коэффициенты в уравнении (34) являются значимыми.

Рассчитаем сумму квадратов S_R , для чего воспользуемся приемом, использованным нами ранее при расчете остаточной суммы квадратов в плане ПФЭ (табл. 6). Так же как и в плане ПФЭ, для проведения необходимых

расчетов используем расчетную матрицу, но уже ортогонального композиционного центрального плана для трех факторов (табл. 16). При заполнении таблицы необходимо выполнять известное правило перемножения знаков. Таким образом, мы получаем исходные данные для расчета остаточной суммы квадратов (табл. 19).

Суммируя построчные значения чисел в столбцах табл. 19, находим расчетные значения выходного параметра. Так, для первого опыта

$$\hat{y}_1 = 25,07 - 1,04 + 2,09 - 2,00 - 0,26 + 0,56 + 0,84 - 1 + 1 = 25,26.$$

Аналогично вычисляем сумму чисел в остальных четырнадцати строках плана и заполняем таким образом столбец \hat{y}_n . Разность значений в столбцах \bar{y}_n и \hat{y}_n характеризует степень неадекватности полученной модели. Для проверки адекватности модели воспользуемся критерием Фишера:

$$F = \frac{S_D / f_1}{S_E / f_2},$$

где $S_D = \gamma S_R$;

$$f_1 = N - q = 15 - 9 = 6.$$

Отсюда

$$F = \frac{2 \cdot 0,5401 / 6}{5,85 / 15} = 0,46 < F_{0,05} = 2,90.$$

Таким образом, полученное уравнение адекватно описывает опытные данные. Значение критерия Фишера, определенное при 5 %-ном уровне значимости из таблиц (табл. 27), значительно превосходит вычисленное на основе экспериментальных данных.

Построение и расчет ротатабельных композиционных планов. Ротатабельный центральный композиционный план строится аналогично ортогональному плану второго порядка. Также как и в случае ортогонального плана, в качестве ядра плана может быть использован полный или дробный факторные планы. Величина звездного плеча α для ротатабельного плана второго порядка зависит лишь от факторного пространства, то есть количества независимых переменных, влияющих на процесс.

При ротатабельном планировании второго порядка очень важно правильно выбрать количество опытов на нулевом уровне. Оказывается, что, меняя число точек в центре ротатабельного плана, можно менять его информационные свойства. В таблице 20 приведены значения плеча α и число n_0 точек в центре плана, звездных точек и общего числа точек N для некоторых так называемых **ротатабельных униформ-планов** второго порядка. Униформ-планы являются наилучшими по информационному профилю в сравнении с другими ротатабельными планами, поэтому только они и получили некоторое распространение в исследовательской практике.

Таблица 20

Размерность	Ядро плана	Число звездных точек	n_0	N	α
2	2^2	4	5	13	1,414
3	2^3	6	6	20	1,682
4	2^4	8	7	31	2,000
5	2^5	10	10	52	2,378
	2^{5-1}	10	6	32	2,000
6	2^6	12	15	91	2,828
	2^{6-1}	12	9	53	2,378

В качестве примера построим ротатабельный центральный композиционный план для трех факторов. За основу при построении плана следует принять план ПФЭ для такого же количества факторов. Характер расположения опытных точек в ротатабельном равномерном плане понятен из таблицы 21.

Таблица 21

№ П/П	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	y
1	-	-	-	+	+	+	+	+	+	13,3
2	+	-	-	-	-	+	+	+	+	10,5
3	-	+	-	-	+	-	+	+	+	13,3
4	+	+	-	+	-	-	+	+	+	19,0
5	-	-	+	+	-	-	+	+	+	20,3
6	+	-	+	-	+	-	+	+	+	6,0
7	-	+	+	-	-	+	+	+	+	10,1
8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	11,6
9	-1,682	0	0	0	0	0	2,828	0	0	25,4
10	+1,682	0	0	0	0	0	2,828	0	0	18,5
11	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,828	0	14,2
12	0	+1,682	0	0	0	0	0	2,828	0	10,3
13	0	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,828	19,5
14	0	0	+1,682	0	0	0	0	0	2,828	11,6
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21,2
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,9
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16,4
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17,1
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,9
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20,6

Столбцы x_1 , x_2 , x_3 в таблице образуют матрицу указанного плана. Как видно из построения, составленный план аналогичен построенному выше ортогональному плану второго порядка (табл. 14). Отличие заключается в величине звездного плеча α и количестве опытных точек в центре плана. Звездное плечо в ротатабельном плане выбирается равным радиусу сферы, описанной вокруг геометрической фигуры, иллюстрирующей расположение опытных точек в

ядре, в нашем случае – вокруг куба. При необходимости построения плана для другого числа факторов за основу следует взять план ПФЭ илиДФЭ для заданного числа переменных (ядро плана) и в соответствии с таблицей 21 пристроить к нему $2k$ звездных точек (k – количество факторов). Как и в ортогональных планах, применение дробных реплик для построения ядра ротатабельных планов возможно лишь при $k \geq 5$, причем для k , равного 5, 6, 7, возможно использовать лишь полуреплики планов ПФЭ.

Построение расчетной матрицы ротатабельных планов уже не связано с необходимостью преобразования столбцов, характеризующих квадратичные эффекты, как это было нами сделано в ортогональном плане второго порядка. Характер построения расчетной матрицы иллюстрирует таблица 21.

В последнем столбце таблицы 21 приведены значения выходного параметра, смысл которого, а также начальные условия примера, на основании которого проведены расчеты, мы не приводим.

Прежде чем приступить к обработке данных, отметим, что дублировать опыты в ротатабельных планах второго порядка не принято, это является их определенным преимуществом. Для определения суммы квадратов S_E , характеризующей ошибку опытов, используют результаты наблюдений в центре плана. Первоначально определяют среднее значение функций y_0 из n_0 опытных точек в центре. В нашем случае

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{6}(21,2 + 24,9 + 16,4 + 17,1 + 18,9 + 20,6) = 19,85.$$

После этого рассчитывают сумму квадратов отклонений S_E текущих значений выходного параметра y_0 от их среднего значения \bar{y}_0 :

$$S_E = \sum_{n=1}^{n_0} (y_0 - \bar{y}_0)^2. \quad (37)$$

В нашем случае

$$S_E = (21,2 - 19,85)^2 + (24,9 - 19,85)^2 + (16,4 - 19,85)^2 + (17,1 - 19,85)^2 + (20,6 - 19,85)^2 = 48,0.$$

Дисперсию, характеризующую ошибки наблюдений S_2 , определяют по формуле

$$S^2 = \frac{1}{n_0 - 1} S_E. \quad (38)$$

В примере $S^2 = \frac{1}{6 - 1} 48,0 = 9,6.$

Для расчета коэффициентов уравнения регрессии второго порядка составим на основе расчетной матрицы таблицу, строки которой заполним по аналогии с рассмотренными выше планами произведениями y_n на кодированные значения соответствующих эффектов (табл. 22).

Внизу таблицы 22 приведены суммы чисел по столбцам с учетом их

знаков. Введем следующие обозначения:

$$0y = \sum_{n=1}^N y_n; \quad (39)$$

$$iy = \sum_{n=1}^N x_{in} y_n; \quad (40)$$

$$ijy = \sum_{n=1}^N x_{in} x_{jn} y_n; \quad (41)$$

$$i^2y = \sum_{n=1}^N x_{in}^2 y_n; \quad (42)$$

$$\sum_{i=1}^K i^2y = \sum_{i=1}^K \sum_{n=1}^N x_{in}^2 y_n. \quad (43)$$

В нашем случае (см. предпоследнюю строку таблицы 2.22) $0y = 321,2$; $1y = -21,5$; $2y = -2,7$; $3y = -23,9$; $12y = 24,3$; $13y = -15,7$; $23y = -13,1$; $11y = 228,2$;

$22y = 173,4$; $33y = 187,8$; $\sum_{n=1}^N i^2y = 589,4$.

Таблица 22

№ п/п	yx_0	yx_1	yx_2	yx_3	yx_1x_2	yx_1x_3	yx_2x_3	yx_1^2	yx_2^2	yx_3^2
1	13,3	-13,3	-13,3	-13,3	+13,3	+13,3	+13,3	13,3	13,3	13,3
2	10,5	+10,5	-10,5	-10,5	-10,5	-10,5	+10,5	10,5	10,5	10,5
3	13,3	-13,3	+13,3	-13,3	-13,3	+13,3	-13,3	13,3	13,3	13,3
4	19,0	+19,0	+19,0	-19,0	+19,0	-19,0	-19,0	19,0	19,0	19,0
5	20,3	-20,3	-20,3	+20,3	+20,3	-20,3	-20,3	20,3	20,3	20,3
6	6,0	+6,0	-6,0	+6,0	-6,0	+6,0	-6,0	6,0	6,0	6,0
7	10,1	-10,1	+10,1	+10,1	-10,1	-10,1	+10,1	10,1	10,1	10,1
8	11,6	+11,6	+11,6	+11,6	+11,6	+11,6	+11,6	11,6	11,6	11,6
9	25,4	-42,7	0	0	0	0	0	71,8	0	0
10	18,5	+31,7	0	0	0	0	0	52,3	0	0
11	14,2	0	-23,8	0	0	0	0	0	40,2	0
12	10,3	0	+17,3	0	0	0	0	0	29,1	0
13	19,5	0	0	-32,8	0	0	0	0	0	55,1
14	10,1	0	0	+17,0	0	0	0	0	0	28,6
15	21,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	24,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	16,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	17,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	18,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	20,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\sum_{n=1}^N$	321,2	-21,5	-2,7	-23,9	24,3	-15,7	-13,1	228,2	173,4	187,8
$\sum_{n=1}^N i^2y_n$	589,4									

Вычисление коэффициентов производится в общем случае по формулам:

$$b_0 = c_1(y_0) - c_2 \left(\sum_{i=1}^k iiy \right); \quad (44)$$

$$b_i = c_3(iy); \quad (45)$$

$$b_{ij} = c_4(ijy); \quad (46)$$

$$b_{ii} = c_5(iiy) + c_6 \left(\sum_{i=1}^k iiy \right) - c_2(0y). \quad (47)$$

Значение констант c_1 – c_6 зависит лишь от количества факторов, влияющих на процесс, а также от степени дробности реплики при построении ротатабельного плана на ядре из плана ДФЭ. Для равномер-ротатабельных планов значения указанных констант приведены в таблице 23.

Таблица 23

Ядро плана	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
2^2	0,2	0,1	0,125	0,25	0,125	0,0188	0,1437
2^3	0,1663	0,0568	0,0732	0,125	0,0625	0,0069	0,0694
2^4	0,1429	0,0357	0,0417	0,063	0,03125	0,0037	0,0350
2^{5-1}	0,1591	0,0341	0,0417	0,063	0,03125	0,0028	0,0341
2^5	0,0988	0,0191	0,0231	0,031	0,01560	0,0015	0,0180
2^{6-1}	0,1108	0,0187	0,0231	0,031	0,01560	0,0012	0,0168
2^{7-1}	0,0703	0,0098	0,0125	0,015	0,00780	0,0005	0,0083

С учетом приведенных в таблице 23 констант и формул (44)–(47) расчет коэффициентов уравнения регрессии второго порядка будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} b_0 &= 0,1663 \cdot 321,2 - 0,0568 \cdot 589,4 = 19,95; \\ b_1 &= 0,07322(-21,5) = -1,57; \quad b_2 = -1,20; \quad b_3 = -1,78; \\ b_{12} &= 0,125 \cdot 24,3 = 3,04; \quad b_{13} = -1,96; \quad b_{23} = -1,64; \\ b_{11} &= 0,0625 \cdot 228,2 + 0,00689 \cdot 589,4 - 0,0568 \cdot 321,2 = 0,086; \\ b_{22} &= -3,34; \quad b_{33} = -2,43. \end{aligned}$$

Уравнение регрессии с рассчитанными коэффициентами, построенное по опытными данным таблицы 21, приобретает следующий вид:

$$\begin{aligned} y &= 19,95 - 1,57x_1 - 0,20x_2 - 1,78x_3 + 3,04x_1x_2 - 1,96x_1x_3 - \\ &\quad - 1,64x_2x_3 - 0,08x_1^2 - 3,34x_2^2 - 2,43x_3^2. \end{aligned} \quad (48)$$

Проверим значимость коэффициентов. Как и в ортогональном композиционном планировании второго порядка, дисперсия ошибок наблюдений, характеризующая воспроизводимость опытов, распределяется в ротатабельных планах между группами коэффициентов не равномерно. Расчет дисперсии отдельных групп коэффициентов производится в общем виде по

формулам:

$$S_0^2 = c_1 S^2; \quad (49)$$

$$S_i^2 = c_3 S^2; \quad (50)$$

$$S_{ij}^2 = c_4 S^2; \quad (51)$$

$$S_{ii}^2 = c_7 S^2; \quad (52)$$

$$\text{cov}(b_0 b_{ii}) = c_2 S^2; \quad (53)$$

$$\text{cov}(b_{ii} b_{jj}) = c_6 S^2. \quad (54)$$

Значения констант c_1-c_7 , необходимые для вычисления дисперсий коэффициентов, берем из таблицы 2.23.

Дисперсия ошибок наблюдений S^2 равна 9,6 (см. выше). Тогда

$$S_0^2 = 0,1663 \cdot 9,6 = 1,596; \quad S_0 = 1,264;$$

$$S_i^2 = 0,07322 \cdot 9,6 = 0,703; \quad S_i = 0,838;$$

$$S_{ij}^2 = 0,125 \cdot 9,6 = 1,2; \quad S_{ij} = 1,095;$$

$$S_{ii}^2 = 0,0694 \cdot 9,6 = 0,666; \quad S_{ii} = 0,816.$$

Рассчитаем доверительные интервалы для дисперсий групп коэффициентов по известной формуле $\delta_i = t_{\text{кр}} S_i$.

Значение критического распределения Стьюдента $t_{\text{кр}}$ для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и $f_2 = 5$ равно 2,57 (табл. 26), значит, $\delta_0 = 2,57 \cdot 1,264 = 3,25$; $\delta_i = 2,57 \cdot 0,838 = 2,15$; $\delta_{ij} = 2,57 \cdot 1,095 = 2,81$; $\delta_{ii} = 2,57 \cdot 0,816 = 2,10$.

После исключения из уравнения (48) эффектов с незначимыми коэффициентами окончательно уравнение, используемое нами для оценки адекватности модели, будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 19,95 + 3,04x_1x_2 - 3,34x_2^2 - 2,43x_3^2. \quad (55)$$

Первоначально определим значения \hat{y} в точках плана, для чего по известной схеме заполним столбцы расчетной матрицы (табл. 21) произведениями значимых коэффициентов уравнения (55) на соответствующие кодированные значения эффектов и просуммируем построчные значения чисел (табл. 24). Сумма квадратов отклонений построчных значений \hat{y} , y и составит S_R

Сумма квадратов S_D , характеризующая собой ошибку неадекватности модели (55), определится следующим образом:

$$S_D = S_R - S_E. \quad (56)$$

Число степеней свободы f_1 , связанное с S_D ,

$$f_1 = N - q - n_0 + 1. \quad (57)$$

Для нашего примера $f_1 = 20 - 4 - 6 + 1 = 11$; $S_D = 232 - 48 = 184$.

Значение критерия Фишера $F = \frac{184/11}{48/5} = 1,84$ меньше табличного,

равного 4,70, для уровня значимости 0,05 и числа степеней свободы $f_1 = 11$, $f_2 = 5$. Таким образом, можно считать, что полученное эмпирическое уравнение достаточно верно описывает опытные данные.

Таблица 24

№ п/п	b_0	$b_{12}x_1x_3$	$b_{22}x_2^2$	$b_{33}x_3^2$	\hat{y}	y	$(\hat{y} - y)^2$
1	19,95	3,04	-3,34	-2,43	17,22	13,3	15,37
2	19,95	-3,04	-3,34	-2,43	11,14	10,5	0,41
3	19,95	-3,04	-3,34	-2,43	11,14	13,5	4,67
4	19,95	3,04	-3,34	-2,43	17,22	19,0	3,17
5	19,95	3,04	-3,34	-2,43	17,22	20,3	9,49
6	19,95	-3,04	-3,34	-2,43	11,14	6,0	26,42
7	19,95	-3,04	-3,34	-2,43	11,14	10,1	1,08
8	19,95	3,04	-3,34	-2,43	17,22	11,6	31,58
9	19,95	0	0	0	19,95	25,4	29,70
10	19,95	0	0	0	19,95	18,5	2,10
11	19,95	0	-9,45	0	10,50	14,2	13,69
12	19,95	0	-9,45	0	10,50	10,3	0,04
13	19,95	0	0	-6,87	12,58	19,5	47,89
14	19,95	0	0	-6,87	12,58	10,1	6,15
15	19,95	0	0	0	19,95	21,2	1,56
16	19,95	0	0	0	19,95	24,9	16,40
17	19,95	0	0	0	19,95	16,4	12,60
18	19,95	0	0	0	19,95	17,1	8,12
19	19,95	0	0	0	19,95	18,9	1,10
20	19,95	0	0	0	19,95	20,6	0,42
							$S_R = 232,0$

Как видно из приведенных выше расчетов, процедура регрессионного и дисперсионного расчетов для планов 2-го порядка несколько усложнена. А если расчету подлежат три, пять, а бывает и больше десяти выходных параметров, зависящих от условий проведения процесса (входных параметров), то возникает вопрос: нельзя ли уменьшить трудовые затраты при экспериментировании именно за счет сокращения времени на расчетные процедуры.

Таблица 25 – Значение критерия Кохрена $G_{0,05}(\gamma-1, N)$

f_2	$\gamma - 1$						
	1	2	3	4	5	6	7
2	0,9985	0,9392	0,9392	0,9057	0,8772	0,8534	0,8332
3	9669	8709	7977	7457	7071	6771	6530
4	9065	7679	6841	6287	5895	5598	5365
5	0,8412	0,6838	0,5981	0,5440	0,5063	0,4783	0,4564
6	7808	6161	5321	4803	4447	4184	3980
7	7271	5612	4800	4307	3974	3726	3535
8	0,6798	0,5157	0,4377	0,3910	0,3595	0,3362	0,3185
9	6385	4775	4027	3584	3286	3067	2901
10	6020	4450	3733	3311	3029	2813	2666
12	0,5410	0,3924	0,3264	0,2880	0,2624	0,2439	0,2299
15	4709	3346	2758	2419	2195	2034	1911
20	3894	2705	2205	1921	1735	1602	1501
24	0,3434	0,2354	0,1907	0,1656	0,1493	0,1374	0,1286

Таблица 26 – Значения t – распределения Стьюдента ($t_{кр}$)

f_2	α			f_2	α		
	0,01	0,05	0,10		0,01	0,05	0,10
1	63,657	12,706	6,314	17	2,898	2,110	1,740
2	9,925	4,303	2,920	18	2,878	2,101	1,734
3	5,841	3,128	2,353	19	2,861	2,093	1,729
4	4,604	2,776	2,132	20	2,845	2,086	1,725
5	4,032	2,571	2,015	21	2,831	2,080	1,721
6	3,707	2,447	1,943	22	2,819	2,074	1,717
7	3,499	2,365	1,895	23	2,807	2,069	1,714
8	3,355	2,306	1,860	24	2,797	2,064	1,711
9	3,250	2,262	1,833	25	2,787	2,060	1,708
10	3,169	2,228	1,812	26	2,779	2,056	1,706
11	3,106	2,201	1,796	27	2,771	2,052	1,703
12	3,055	2,179	1,782	28	2,763	2,048	1,701
13	3,012	2,160	1,771	29	2,756	2,045	1,699
14	2,977	2,145	1,761	30	2,750	2,042	1,697
15	2,947	2,131	1,753	40	2,704	2,021	1,684
16	2,921	2,120	1,746	60	2,660	2,000	1,671

Таблица 27 – Значение F -критерия Фишера для различных уровней значимости α

f_2	f_1								
	1	2	3	4	5	6	8	10	20
Уровень значимости $\alpha = 0,05$									
1	161	200	216	225	230	234	239	242	248
2	18,51	19,0	19,16	19,25	19,30	19,33	19,37	19,39	19,44
3	10,13	9,55	9,25	9,12	9,01	8,94	8,85	8,79	8,66
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,04	5,96	5,80
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,82	4,74	4,56
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,15	4,06	3,87
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,73	3,64	3,44
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,44	3,35	3,15
9	5,12	4,26	3,89	3,63	3,48	3,37	3,23	3,14	2,83
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,07	2,98	2,77
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	2,95	2,85	2,65
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,85	2,75	2,54
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,77	2,67	2,46
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,70	2,60	2,39
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,64	2,54	2,33
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,59	2,49	2,28
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,55	2,45	2,19
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,51	2,41	2,15
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,48	2,38	2,11
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,45	2,35	2,08
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,40	2,30	2,03
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,36	2,25	1,98
Уровень значимости $\alpha = 0,01$									
1	4052	4999	5403	5625	5764	5859	5981	6056	6209
2	98,50	99,0	99,17	99,25	99,30	99,33	99,37	99,40	99,45
3	34,12	30,82	29,46	28,71	28,24	27,99	27,49	27,23	26,69
4	21,20	18,00	16,69	15,98	15,52	15,21	14,80	14,55	14,02
5	16,26	13,27	12,06	11,39	10,97	10,67	10,29	10,05	9,55
6	13,74	10,92	9,78	9,15	8,75	8,47	8,10	7,87	3,39
7	12,25	9,55	8,45	7,85	7,46	7,19	6,84	6,62	6,16
8	11,26	8,65	7,59	7,01	6,63	6,37	6,03	5,81	5,36
9	10,56	8,02	6,99	6,42	6,06	5,80	5,47	5,26	4,81
10	10,04	7,56	6,55	5,99	5,64	5,39	5,06	4,85	4,41
12	9,33	6,93	5,95	5,41	5,06	4,82	4,50	4,30	3,86
14	8,86	6,51	5,56	5,04	4,70	4,46	4,14	3,94	3,51
16	8,53	6,23	5,29	4,77	4,44	4,20	3,89	3,69	3,26
18	8,29	6,01	5,09	4,58	4,25	4,01	3,71	3,51	3,08
20	8,10	5,85	4,94	4,43	4,10	3,87	3,56	3,37	2,94

Данная глава является выдержкой из учебного пособия:

Богданович, Н. И., Планирование эксперимента в примерах и расчетах : учеб. пособие / Н. И. Богданович, Л. Н. Кузнецова, С. И. Третьяков, В. И. Жабин. – Архангельск, 2010. – 126 с. ISBN 978-5-261-00523-0.

7. ФОРМЫ ОТЧЕТНОСТИ ПО ПРАКТИКЕ

Отчет по практике является основным документом, подтверждающим прохождение практики и выполнение программы практики.

Во время прохождения практики студент ведет дневник практики, который является основанием для составления отчета по практике.

Отчет оформляется по следующей структуре: титульный лист, задание на практику, содержание, введение, основная часть, заключение, библиографический список, приложения.

- *Содержание*

Содержание содержит перечень полных заглавий всех разделов и подразделов отчёта с указанием их начальных страниц.

- *Введение*

Во введении указываются цели и задачи практики, а также перечень основных работ и заданий, выполненных в процессе прохождения практики.

- *Общая характеристика предприятия (при наличии)*

Включает краткие сведения о структуре предприятия, форме собственности, производственной базе, о разрешенных видах строительных работ.

- *Основная часть*

В этом разделе рекомендуется привести сведения об инженерных системах предприятия или стройплощадки, технологию производства работ или характеристики основных технологических процессов, результаты выполнения индивидуального задания.

- *Заключение*

Приводится мнение студента о результатах практики. Необходимо кратко перечислить новые полученные знания, достоинства и недостатки практики, предложения и пожелания по улучшению прохождения практики.

- *Библиографический список*

Литература располагается в перечне в порядке упоминания в отчете.

- *Приложения*

Приложения содержат вспомогательный материал: большие по объему таблицы, рисунки, формы документации, методики сбора исходных данных и т.д. Все приложения должны быть озаглавлены и пронумерованы.

Пояснительная записка отчета выполняется в электронном виде на белой бумаге формата А4 (210×297 мм). Объем записки должен быть 20-25 страниц текста с необходимыми схемами. Вокруг текста на странице оставляются чистые поля. Ширина поля должна быть с левой стороны 30 мм, с правой стороны – 15 мм, внизу и сверху – по 20 мм. Каждый раздел отчета рекомендуется начинать с новой страницы. Нумерация страниц должна быть сквозной. На титульных листах номера страницы не ставится (Приложение 1,2). Нумерация начинается с 5 страницы, где будет раздел СОДЕРЖАНИЕ. На схемы, рисунки и таблицы, которые приведены в отчёте, необходимо делать ссылки. При ссылке на таблицу указывают ее номер (например: табл. 4.1), где 4

– номер раздела, а 1 – номер таблицы в разделе. Схемы и рисунки выполняются с соблюдением правил технического черчения и ГОСТа.

Категорически запрещается переписывать в отчет дословные тексты из проектов предприятий. На титульном листе отчета должны быть дата проверки руководителем практики от предприятия (главным инженером), его подпись и печать предприятия.

Оформленный отчет по практике представляется руководителю практики.

8. ФОРМЫ, ПОРЯДОК АТТЕСТАЦИИ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПО ПРАКТИКЕ

Результаты промежуточной аттестации всех видов и типов практик определяются на основании отчета обучающихся о прохождении практики, дневника практики обучающихся, защиты отчета.

Отчет по практике должен соответствовать СТО СМК 4.2.3.05 «Оформление выпускных квалификационных и курсовых работ (проектов)». Руководитель практики проверяет соответствие оформления отчета требованиям нормоконтроля. При отсутствии замечаний отчет допускается к защите. Выявленные замечания студент должен устранить в установленные сроки и снова сдать работу на проверку. Если работа не соответствует требованиям, то она к защите не допускается. Студенту назначается дополнительное время для выполнения и подготовки отчета к защите при согласовании с деканатом.

Студент готовит доклад по теме отчета с оформлением табличного или графического материала, и представляет его в виде презентации. На представление доклада отводится не более 10 минут. После доклада студент дает ответы на вопросы.

Результаты промежуточной аттестации всех видов и типов практик определяются на основании отчета обучающихся о прохождении практики, дневника практики обучающихся, защиты отчета. Formой промежуточной аттестации всех видов и типов практик является зачет с оценкой («отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»). Оценка по практике проставляется в ведомости и в зачетной книжке. Отчет хранится в архиве кафедры в течение пяти лет. Обучающиеся, не прошедшие практику по неуважительной причине, или получившие оценку «неудовлетворительно» при промежуточной аттестации результатов прохождения практики, считаются имеющими академическую задолженность.

Оценка «отлично» – сроки прохождения практики соблюдены полностью, отчетные материалы полностью соответствуют программе практики; индивидуальное задание выполнено полностью и на высоком уровне; получен положительный отзыв от предприятия; отчет оформлен в соответствии с требованиями; изложение полученных знаний в устной, письменной или графической форме, полное, в системе; допускаются единичные несущественные ошибки, самостоятельно исправляемые студентами; выделение существенных признаков изученного с помощью операций анализа и синтеза; выявление причинно-следственных связей; формулировка выводов и обобщений; свободное оперирование известными фактами и сведениями с использованием сведений из других дисциплин; ответы на вопросы полные, исчерпывающие, демонстрирующие глубоко понимание предмета.

Оценка «хорошо» – сроки прохождения практики соблюдены полностью, отчетные материалы в целом соответствуют программе практики, содержат стандартные выводы и рекомендации; индивидуальное задание выполнено с

несущественными ошибками; получен положительный отзыв от предприятия; отчет оформлен в соответствии с требованиями; изложение полученных знаний в устной, письменной и графической форме, полное, в системе; допускаются отдельные несущественные ошибки, исправляемые студентом после указания преподавателя на них; выделение существенных признаков изученного с помощью операций анализа и синтеза; выявлений причинно-следственных связей; формулировка выводов и обобщений, в которых могут быть отдельные несущественные ошибки; подтверждение изученного известными фактами и сведениями; ответы на вопросы полные; подход к материалу ответственный, но стандартный.

Оценка «удовлетворительно» – сроки прохождения практики соблюдены полностью, отчетные материалы в целом соответствуют программе практики, собственные выводы и рекомендации отсутствуют; индивидуальное задание выполнено с существенными ошибками; получен удовлетворительный отзыв от предприятия; отчет оформлен с многочисленными несущественными ошибками; изложение полученных знаний неполное, однако, это не препятствует усвоению последующего материала; допускаются отдельные существенные ошибки, исправленные с помощью преподавателя; затруднения при выявлении существенных признаков изученного, причинно-следственных связей и формулировке выводов; ответы на вопросы с ошибками; демонстрируется понимание материала в целом без углубления в детали.

Оценка «неудовлетворительно» – обучающийся нарушал сроки прохождения практики; отчетные материалы частично не соответствуют программе практики, собственные выводы и рекомендации отсутствуют; индивидуальное задание не выполнено; получен неудовлетворительный отзыв от предприятия; оформление отчета не соответствует требованиям; изложение учебного материала неполное, бессистемное, что препятствует усвоению последующей учебной информации; имеются существенные ошибки, не исправляемые даже с помощью преподавателя; бессистемное выделение случайных признаков изученного; неумение производить простейшие операции анализа и синтеза; делать обобщения, выводы; студент не способен ответить на вопросы, допускает многочисленные грубые ошибки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Граник, Г. Г. Как учить работать с книгой / Г. Г. Граник, С. М. Бондаренко, Л. А. Концевая. – М.: Мой учебник, 2007 – 256 с. – Текст: непосредственный.

2. ГОСТ Р 7.0.5–2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления : введен впервые : дата введения 2009–01–01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с. – Текст: непосредственный.

3. Богданович, Н. И., Планирование эксперимента в примерах и расчетах : учеб. пособие / Н. И. Богданович, Л. Н. Кузнецова, С. И. Третьяков, В. И. Жабин. – Архангельск, 2010. – 126 с. – ISBN 978-5-261-00523-0. – Текст: непосредственный.

4. Рузавин, Г. И. Методы научного исследования / Г. И. Рузавин. – М.: Мысль, 2005 – 237 с. – Текст: непосредственный.

5. Мошина, Т. А. Магистерская диссертация: учебно-методическое пособие / Т. А. Мошина, И. Г. Первова. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2018. – 24 с. – Текст: непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Титульные листы (для студентов, проходящих практику в ВШТЭ СПбГУПТД)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Институт Технологии

Кафедра: Физической и коллоидной химии
Направление подготовки: 18.04.01 Химическая технология
(специальность)
Профиль подготовки: Химическая технология высокомолекулярных
(специализация) соединений

ОТЧЕТ

о прохождении _____
(наименование вида практики)
тип практики: _____
(наименование типа практики)

Руководитель
от СПбГУПТД: _____ (должность, ученая степень / звание, Ф.И.О.) _____ (подпись)
Обучающийся: _____ (Ф.И.О.) _____ (подпись)
Курс _____ Учебная группа: _____

Санкт-Петербург
2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Совместный рабочий график (план) проведения практики и индивидуальное задание

Вид практики _____
Тип практики _____

Обучающийся _____
(Ф.И.О.)

Институт _____ технологии _____
(наименование института)

Курс _____ Учебная группа _____ Форма обучения _____ очная

Направление подготовки (специальность) _____ 18.04.01 Химическая технология
Химическая технология высокомолекулярных соединений

Сроки прохождения практики с _____ по _____
(по календарному учебному графику)

Место прохождения практики ВШТЭ СПбГУПТД _____
(полное наименование организации)

Должность обучающегося на практике (при наличии) _____ -

Совместный рабочий график (план) проведения практики

Дата	Содержание выполняемых работ и заданий
Общие (типовые вопросы, изучаемые в ходе практики)	
Индивидуальное задание	

Требования по выполнению и оформлению индивидуального задания Выполнение и оформление индивидуального задания должны соответствовать учебно-методическому пособию «Организация учебной практики магистров на кафедре физической и коллоидной химии», А. И. Смирнова, Е. Ю. Демьянцева, И. И. Осовская, 2024 г. Индивидуальное задание выполняется в виде раздела общего отчета.

**Вид (ы) отчетных материалов по практике и требования к их оформлению
в соответствии с индивидуальным заданием**

Отчет должен соответствовать пунктам плана задания на практику. Оформление отчета должно соответствовать быть выполнено согласно указанному учебно-методическому пособию. Первая страница отчета – титул (не нумеруется), вторая – задание (не нумеруется), отзыв по практике руководителя (не нумеруется), нумерация начинается с пятой страницы. В работе должен быть представлен обзор литературы по теме индивидуального задания.

Руководитель практики
от СПбГУПТД

_____/_____
(подпись, ф.и.о.)

Принял к исполнению

_____/_____
(подпись, ф.и.о. обучающегося)

Дата получения обучающимся индивидуального задания _____

Отзыв о практике

в ВШТЭ СПбГУПТД
(полное наименование профильной организации)

Обучающийся _____
(Ф.И.О.)

Институт _____ технологии _____
(наименование института)

Курс _____ Учебная группа _____ Форма обучения _____ очная

Направление подготовки (специальность) _____ 18.04.01 Химическая технология _____
(код и наименование направления (специальности))

Профиль подготовки (специализация) _____ Химическая технология высокомолекулярных соединений _____
(наименование профиля по учебному плану)

проходил (а) _____
(вид и тип практики)

с _____ по _____

Инструктаж по ознакомлению с требованиями охраны труда, техники безопасности, пожарной безопасности, а также правилами внутреннего распорядка проведен в установленном порядке

- компетенции, предусмотренные программой практики сформированы
указать - сформированы или не сформированы

- личные и деловые качества

- качество отчета по практике

- рекомендации

- оценка

Руководитель практики от СПбГУПТД _____

Титульные листы (для студентов, проходящих практику в сторонних организациях)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Институт
Технологии

Кафедра: Физической и коллоидной химии
Направление подготовки: 18.04.01 Химическая технология
(специальность)
Профиль подготовки: Химическая технология высокомолекулярных соединений
(специализация)

ОТЧЕТ

о прохождении _____
(наименование вида практики)
тип практики: _____
(наименование типа практики)

Руководитель
от _____: _____
(должность, Ф.И.О., печать организации) (подпись, печать)
Руководитель
от СПбГУПТД: _____
(должность, ученая степень / звание, Ф.И.О.) (подпись)
Обучающийся: _____
(Ф.И.О.) (подпись)
Курс _____ Учебная группа: _____

Санкт-Петербург
2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Совместный рабочий график (план) проведения практики и индивидуальное задание

Вид практики _____
Тип практики _____

Обучающийся _____
(Ф.И.О.)

Институт _____ технологии _____
(наименование института)

Курс _____ Учебная группа _____ Форма обучения _____ очная

Направление подготовки (специальность) _____ 18.04.01 Химическая технология
Химическая технология высокомолекулярных соединений

Сроки прохождения практики с _____ по _____
(по календарному учебному графику)

Место прохождения практики _____
(полное наименование организации)

Должность обучающегося на практике (при наличии) _____ -

Совместный рабочий график (план) проведения практики

Дата	Содержание выполняемых работ и заданий
Общие (типовые вопросы, изучаемые в ходе практики)	
Индивидуальное задание	

Требования по выполнению и оформлению индивидуального задания Выполнение и оформление индивидуального задания должны соответствовать учебно-методическому пособию «Организация учебной практики магистров на кафедре физической и коллоидной химии», А. И. Смирнова, Е. Ю. Демьянцева, И. И. Осовская, 2024 г. Индивидуальное задание выполняется в виде раздела общего отчета.

**Вид (ы) отчетных материалов по практике и требования к их оформлению
в соответствии с индивидуальным заданием**

Отчет должен соответствовать пунктам плана задания на практику. Оформление отчета должно соответствовать быть выполнено согласно указанному учебно-методическому пособию. Первая страница отчета – титул (не нумеруется), вторая – задание (не нумеруется), отзыв по практике руководителя (не нумеруется), нумерация начинается с пятой страницы. В работе должен быть представлен обзор литературы по теме индивидуального задания.

Руководитель практики

от _____
(наименование предприятие)

_____ / _____ /
(подпись, ф.и.о, печать)

Руководитель практики

от СПбГУПТД

_____ / _____ /
(подпись, ф.и.о.)

Принял к исполнению

_____ / _____ /
(подпись, ф.и.о. обучающегося)

Дата получения обучающимся индивидуального задания _____

Отзыв о практике

В _____
(полное наименование профильной организации)

Обучающийся _____
(Ф.И.О.)

Институт _____ технологии _____
(наименование института)

Курс _____ Учебная группа _____ Форма обучения _____ очная _____

Направление подготовки (специальность) _____ 18.04.01 Химическая технология _____
(код и наименование направления (специальности))

Профиль подготовки (специализация) _____ Химическая технология высокомолекулярных соединений _____
(наименование профиля по учебному плану)

проходил (а) _____
(вид и тип практики)

с _____ по _____

Инструктаж по ознакомлению с требованиями охраны труда, техники безопасности, пожарной безопасности, а также правилами внутреннего распорядка проведен в установленном порядке

- компетенции, предусмотренные программой практики _____ сформированы _____
указать - сформированы или не сформированы

- личные и деловые качества

- качество отчета по практике
- рекомендации
- оценка

Руководитель практики _____
(реквизиты приказа по Организации о назначении руководителя практики)

(должность, подпись, Ф.И.О. полностью)

М.П.

Отзыв о практике

в ВШТЭ СПбГУПТД
(полное наименование профильной организации)

Обучающийся _____
(Ф.И.О.)

Институт _____ технологии _____
(наименование института)

Курс _____ Учебная группа _____ Форма обучения _____ очная

Направление подготовки (специальность) _____ 18.04.01 Химическая технология _____
(код и наименование направления (специальности))

Профиль подготовки (специализация) _____ Химическая технология высокомолекулярных соединений _____
(наименование профиля по учебному плану)

проходил (а) _____
(вид и тип практики)

с _____ по _____

Инструктаж по ознакомлению с требованиями охраны труда, техники безопасности, пожарной безопасности, а также правилами внутреннего распорядка проведен в установленном порядке

- компетенции, предусмотренные программой практики сформированы
указать - сформированы или не сформированы

- личные и деловые качества

- качество отчета по практике

- рекомендации

- оценка

Руководитель практики от СПбГУПТД _____

Журнал регистрации инструктажа по охране труда

(полное наименование профильной организации или структурного подразделения СПбГУПТД)

Дата	ФИО инструктируемого	Год рождения	Профессия, должность инструктируемого	Вид инструктажа (вводный, первичный на рабочем месте, повторный, внеплановый)	Причина проведения внепланового инструктажа	ФИО, должность инструктирующего	Подпись	
							инструктирующего	инструктируемого
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Журнал регистрации инструктажа по пожарной безопасности

(полное наименование профильной организации или структурного подразделения СПбГУПТД)

Дата	ФИО инструктируемого	Год рождения	Профессия, должность инструктируемого	Вид инструктажа (вводный, первичный на рабочем месте, повторный, внеплановый)	Название или номер инструкции	ФИО, должность инструктирующего	Подпись	
							инструктирующего	инструктируемого
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Лист ознакомления с правилами внутреннего трудового распорядка

(полное наименование профильной организации / СПбГУПТД)

N п/п	Фамилия, имя, отчество обучающегося	Дата ознакомления	Подпись

Учебное издание

**Смирнова Анастасия Игоревна
Демьянцева Елена Юрьевна
Осовская Ираида Ивановна**

**Организация производственной практики
(научно-исследовательская работа)
магистров на кафедре физической и коллоидной химии**

Учебно-методическое пособие

Редактор и корректор Д. А. Романова
Техн. редактор Д. А. Романова

Учебное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением
для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю. -
Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 04.05.2024 г. Рег. № 5024/24

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.