

Ю.П. Адлер  
Ю.В. Грановский

# **Методология и практика планирования эксперимента в России**

Монография

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Ю.П. Адлер  
Ю.В. Грановский

# **Методология и практика планирования эксперимента в России**

Монография

Рекомендовано редакционно-издательским  
советом университета



Москва 2016

УДК 658:378  
А31

Рецензенты:

канд. техн. наук проф. *А.Ю. Закгейм* (Московский государственный университет тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова);  
д-р хим. наук проф. *М.Н. Астахов*

**Адлер Ю.П.**

А31      Методология и практика планирования эксперимента в России : моногр. / Ю.П. Адлер, Ю.В. Грановский. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2016. – 182 с.  
ISBN 978-5-87623-990-7

Рассмотрены методологические и прикладные аспекты исследований по планированию эксперимента, подготовка кадров, организационные вопросы (научные советы, конференции, семинары и пр.), наукометрические исследования. Особое внимание уделено новым тенденциям в развитии мировой науки и математической статистики, влияющим на математическую теорию эксперимента. Обобщены основные результаты, достигнутые в теории планирования эксперимента. Отмечена экспансия методов планирования эксперимента в разные области науки. Дан прогноз развития работ на основе новой парадигмы математической статистики.

Монография предназначена для бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям подготовки 22.04.02 «Металлургия», 27.04.01 «Стандартизация и метрология», 27.04.02 «Управление качеством». Может быть полезна широкому кругу специалистов, проводящих экспериментальные исследования в разных направлениях науки и техники.

**УДК 658:378**

ISBN 978-5-87623-990-7

© Ю.П. Адлер,  
Ю.В. Грановский, 2016  
© НИТУ «МИСиС», 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
Введение.....	9
<b>1. Первый этап развития исследований по планированию эксперимента в России (1960–1980).....</b>	<b>11</b>
1.1. Методологические исследования.....	11
1.2. Прикладные исследования.....	17
1.3. Подготовка кадров.....	21
1.4. Организационные вопросы.....	27
1.5. Наукометрические исследования.....	29
<b>2. Второй этап развития исследований по планированию эксперимента в России (1981–1991).....</b>	<b>31</b>
2.1. Методологические исследования.....	31
2.2. Прикладные исследования.....	44
2.3. Подготовка кадров.....	49
2.4. Организационные вопросы.....	53
2.5. Наукометрические исследования.....	56
<b>3. Третий этап развития исследований по планированию эксперимента в России (1992–2010).....</b>	<b>58</b>
3.1. Методологические исследования.....	58
3.2. Прикладные исследования.....	64
3.3. Подготовка кадров.....	70
3.4. Организационные вопросы.....	74
3.5. Наукометрические исследования.....	76
Заключение.....	86
Библиографический список.....	93
<b>4. Дополнения.....</b>	<b>105</b>
4.1. Статистика, которая была, которая есть и которая будет.....	107
Библиографический список.....	140
4.2. Парадигмы сменяют друг друга: что делать?.....	143
Библиографический список.....	158
4.3. Наукометрия.....	160
Заключение.....	167
Библиографический список.....	166
Приложение 1. Модели объектов и модели данных.....	168
Приложение 2. Цитирование статей В. В. Налимова по математической статистике и планированию эксперимента.....	176
Приложение 3. Терминологический словарь.....	177

*Посвящается памяти нашего учителя  
Василия Васильевича Налимова*

Для тех, которым все от века ясно,  
Недоуменья наши – праздный бред.  
Двумерен мир, – твердят они в ответ, – А  
думать иначе небезопасно.  
*Герман Гессе. Игра в бисер*

## **Предисловие**

Наверно, планирование экспериментов существовало всегда, однако его начало обычно отсчитывают от работ сэра Рональда Фишера в Великобритании по поводу исследований урожайности сельскохозяйственных культур. Первые статьи появились, видимо, в 1919 г., а в 1935 г. Р. Фишер опубликовал монографию [1], название которой и стало названием этой новой области исследований. Начавшись в полевых сельскохозяйственных опытах, планирование быстро вышло за отраслевые рамки и стало применяться повсеместно. Однако только после Второй мировой войны Дж. Бокс, тоже в Великобритании опубликовал свою знаменитую статью с К. Б. Уилсоном [2], открывшую принципиально новое направление – планирование экстремальных экспериментов, т.е. экспериментов, нацеленных на отыскание оптимальных условий проведения тех или иных процессов. Это было в 1951 г. Тогда стало ясно, что в истории лабораторных исследований начался новый период – период планирования экспериментов. В 1955 г. Дж. Бокс распространил свой подход на исследования, проводимые на промышленном оборудовании, которое одновременно с исследованиями производит товарную продукцию [3–5]. Этот вариант, названный эволюционным планированием (ЭВОП) промышленных экспериментов расширил горизонты и многократно увеличил возможности планирования приносить пользу людям. После этого новые идеи и подходы посыпались как из рога изобилия. Дж. Боксу удалось создать школу, которая локализовалась в университете штата Висконсин в США. Практически одновременно с работами этой школы в Японии профессор Генити Тагути сразу после Второй мировой войны разработал оригинальную концепцию, которую он назвал «технологией качества», ключевым компонентом которой стало планирование экспериментов по Тагути. Этот подход оказался весьма жизнеспособным и внес весомый вклад в развитие идей и методов планирования экспериментов [6, 7]. Внедрение методов плани-

рования экспериментов в США шло негладко, поскольку требовало от экспериментаторов больших усилий, связанных с перестройкой психологии, и более широкого применения математических методов, чем это было принято. Поэтому нет ничего удивительного в том, что появились попытки упрощения сложившихся подходов. Одна из самых удачных попыток такого рода принадлежит Д. Шайнину [8], который предложил свой вариант этого подхода. Хотя он и вызвал резкую критику, ему все же удалось завоевать среди американских инженеров достаточно широкую аудиторию. Таким образом, можно говорить о четырех основных школах методологии и практики планирования эксперимента, существующих в настоящее время. Это школы Р. Фишера, Дж. Бокса, Г. Тагути и Д. Шайнина. Случилось так, что в нашей стране шире всего используются подходы, развитые школой Дж. Бокса. Фишеровский подход отличается лишь объектом исследования, да инструментом анализа – дисперсионным анализом вместо регрессионного. Подход Г. Тагути у нас известен, но используется, как мы думаем, недостаточно широко, а подход Шайнина применяется лишь спорадически. Этим и определяется структура нашей работы. Главным образом мы говорим о подходах Бокса.

Минуло 50 лет с начала регулярных работ по планированию эксперимента в нашей стране. А начиналось все довольно скромно. Единичные публикации, немногочисленные энтузиасты... И уже через короткое время – тысячи статей, сотни монографий, курсы лекций и практикумы в десятках вузах страны. Не остался в стороне и Московский институт стали и сплавов (технологический университет). Первым здесь в сентябре 1961 г. выступил один из авторов этой работы (Ю. А.), а через пару лет доцент Ф.С. Новик прочел свой знаменитый цикл планирования экспериментов на курсах повышения квалификации преподавателей металловедения, который потом превратился в регулярный курс для металловедов с прекрасным учебным пособием и задачник. Через 50 лет картина совсем иная. Так, в 1996–2011 гг. Издательским Домом МИСиС были изданы работы В. Ю. Лопатина и В. Н. Шуменко [9–12].

Конечно, книги издавались и ранее. В издательстве «МИСиС» в 1979, 1982 гг. В.Н. Шуменко издал руководства по планам второго порядка и исследованию области оптимума, планированию эксперимента при изучении диаграмм состав–свойство и планированию промышленных экспериментов и учебное пособие по планированию

эксперимента. Другой автор, В. Ю. Лопатин, издал курс лекций (1999) по выбору факторов и параметра оптимизации, планам первого порядка. Но этим список изданий не ограничивается. Например, еще раньше было издано учебное пособие для практических занятий по организации эксперимента В. А. Карасева и Л. З. Румшинского (1986). Появились и методические указания по организации эксперимента при выполнении курсовой работы для специальности «Обработка металлов давлением» С. Д. Прокошкина с соавторами (2003). Все это не более чем примеры большой работы по обучению студентов методам планирования эксперимента.

Одно из подразделений вуза, в котором успешно и достаточно давно проводится учебная и исследовательская работа по планированию эксперимента – кафедра сертификации и аналитического контроля. Кафедрой разработан образовательный стандарт высшего профессионального образования по направлению подготовки 221400 (27.03.02) «Управление качеством» с выпуском бакалавров. Студенты овладевают навыками планирования и организации эксперимента. В этом же направлении действует созданное в 1995 г. структурное подразделение МИСиС «Металлсертификат».

Авторы настоящей работы не ставили перед собой задачу составления и анализа списка руководств и учебных пособий по планированию эксперимента, изданных в МИСиС. Руководства и пособия носят рецептурный характер: как выбрать план эксперимента, как проводить опыты, обрабатывать их результаты и пр. Но помимо таких руководств нужны и другие, освещающие вопросы, недостаточно рассмотренные в литературе. К ним относятся развитие работ по математической теории эксперимента, подготовке кадров, организации исследований по планированию эксперимента. Отдельного рассмотрения заслуживают и наукометрические исследования в данной области.

Среди известных нам работ по идейному развитию математической теории эксперимента выделяется монография В. В. Налимова, Т. И. Голиковой по логическому основанию планирования эксперимента, изданная в 1981 г. (второе издание) [13]. Прошло более 30 лет, возникли новые направления исследований, новые тенденции как в развитии мировой науки, так и в математической статистике, влияющие на теорию планирования эксперимента. Без понимания логики развития идей усвоение методических руководств по планированию эксперимента вряд ли будет успешным [14].

Хотя в предлагаемой работе не приводятся методические рекомендации в отношении прикладных работ, без рассмотрения вопросов применения планирования эксперимента все же не обойтись. Здесь обращено внимание на экспансию методов планирования эксперимента в разные области исследований. В условиях набирающей силы тенденции периодической смены направления работ научных работников такая информация представляется полезной. Еще более важное дело – осознание трудностей в проведении прикладных работ и возможные способы их преодоления.

Никакое важное дело не обходится без обучения, без подготовки людей. В планировании эксперимента это масштабная работа, поскольку важно создать массового постоянного пользователя, не забывая при этом о подготовке специалистов и консультантов, что мало освещено в литературе. И если развитие прикладных исследований можно оценить положительно, в отношении подготовки кадров по теории и методологии планирования эксперимента этого сказать нельзя. Здесь не учитывается опыт ряда передовых стран и одна из задач этой работы – привлечь внимание к данному обстоятельству. То же самое можно сказать и об организации отечественных исследований по планированию эксперимента.

Помимо отмеченных выше задач, представлялось важным рассмотреть наукометрические исследования по планированию эксперимента. Уникальный случай в отечественной науке, когда для развития научного направления использовались методы наукометрии. Это оказалось возможным, так как профессор В. В. Налимов был руководителем научных школ как по планированию эксперимента, так и по наукометрии. В последние годы вопросам применения наукометрии для повышения эффективности научных исследований уделяется большое внимание. И опыт использования здесь количественных методов будет несомненно востребован.

Первоначальный сокращенный вариант первой части данной работы докладывался на международной конференции по планированию экспериментов и опубликован в ее трудах [15].

Выход в свет этой работы показал, что она нуждается в существенном методологическом развитии, поскольку в современной прикладной математической статистике начались глубокие революционные преобразования. Так появились дополнения. Для удобства



читателей в работе приведен краткий терминологический словарь (Приложение 3).

Для чтения этой работы достаточно иметь математическую подготовку в объеме вузовской программы, включающей разделы по теории вероятностей и математической статистике.

Многие люди способствовали появлению этой работы. К сожалению, выразить благодарность формально можно лишь некоторым. Вот наш краткий список: А.Ю. Закгейм, А.Н. Лисенков, В.Ю. Смелов, Т.А. Чемлева, В.Л. Шпер. Все замечания и предложения будут приняты авторами с благодарностью. Их можно передавать по e-mail [adler.37@inbox.ru](mailto:adler.37@inbox.ru) – Адлеру Юрию Павловичу; [zpch@rambler.ru](mailto:zpch@rambler.ru) – Грановскому Юрию Васильевичу и в письменном виде по адресу: 119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4, НИТУ МИСиС, кафедра сертификации и аналитического контроля, проф. Ю. П. Адлеру.

## Введение

Началом исследований по планированию эксперимента в России считается 1960 г., когда в журнале «Успехи химии» была опубликована статья проф. В. В. Налимова, написанная по материалам зарубежных работ [16]. Там было отмечено, что в 1951 г. Бокс и Уилсон предложили новый метод поиска оптимальных решений при протекании химических реакций, основанный на применении современной математической статистики при планировании эксперимента и обработке его результатов [2]. В отличие от обычных методов экспериментирования в этом методе число опытов и условия их проведения определялись на основе математически обоснованных правил. Кроме того, здесь одновременно варьировались все факторы. Все это приводило к резкому сокращению числа опытов. Дополнительно экспериментатор получал информацию и об эффектах взаимодействия факторов, не выделяемых в «классическом» однофакторном эксперименте. На последнем этапе результаты представлялись математической моделью, что позволяло определять оптимальные условия процесса при изменении варьируемых факторов, например при изменении свойств исходных материалов.

Идея метода была пояснена сокращенным и переработанным переводом главы из книги [17]. В отдельные разделы отнесены описание метода, поиск почти стационарной области (области оптимума), экспериментирование в почти стационарной области, случай большого числа независимых переменных. Все разделы включали числовые примеры. Отмечены около 15 публикаций по применению метода в химических исследованиях. Однако метод еще не стал массовым. Его широкому применению препятствовала традиционная система образования, при которой химики, металлурги, физики не знакомятся с идеями и возможностями современной математической статистики.

В. В. Налимов работал в то время во Всесоюзном научно-исследовательском и проектном институте редкометаллической и полупроводниковой промышленности (Гиредмет). После выхода в свет статьи [16] в этой организации он прочитал курс лекций по математической статистике и планированию эксперимента, предваряющий работу научного семинара по планированию эксперимента.

К 1964 г. было опубликовано 20 статей прикладного плана [18], а через два года число публикаций возросло на порядок [19]. Во второй половине 1960-х годов в нашей стране начались теоретические и методологические исследования.

Конечно, нельзя сказать, что первые работы В. В. Налимова появились на совершенно пустом месте. Здесь нет возможности детально вдаваться в предысторию, поэтому ограничимся лишь несколькими примерами. Если оставить в стороне отечественные работы по применению статистических методов в биологии, которые были разгромлены Т. Д. Лысенко и его приспешниками, то приложения статистики в технике остались нетронутыми. Поэтому почти сразу после окончания Великой отечественной войны стали появляться отечественные и переводные книги, подготовившие почву для планирования эксперимента. Так, в 1947 г. была опубликована работа: В.И. Романовского «Применение математической статистики в опытном деле» [20]. Затем появилась важная фундаментальная работа И.В. Дунина-Барковского и Н.В. Смирнова «Теория вероятностей и математическая статистика в технике» (общая часть) [21] и хорошо дополняющая ее книга датского статистика А. Хальда «Математическая статистика с техническими приложениями» [22]. Как написал сам Хальд в предисловии, он следовал работам Р. Фишера и У. Шухарта. Интересно, что еще в 1949 г. была переведена книга по планированию эксперимента К. Браунли [23]. Рынок был еще совершенно не готов к восприятию идей планирования эксперимента, о чем свидетельствует, например, то, что один из авторов этой работы (Ю. А.) купил ее случайно в 1960 г. как уцененную за 20 коп. (это была одна из самых выгодных покупок в жизни). Любопытно, что академик А.Н. Колмогоров оценил эту книгу в своем предисловии к русскому переводу как слишком рецептурную, хотя и отметил ее некоторые достоинства.

В дальнейшем изложении период времени с 1960 по 2010 г. нами разделен на три этапа: 1) 1960–1980 гг.; 2) 1981–1991 гг.; 3) 1992–2010 гг. На каждом этапе рассмотрены методологические и прикладные аспекты исследований по планированию эксперимента, публикации (книги, обзоры, статьи – выборочно), подготовка кадров, организационные вопросы (научные советы, конференции, семинары и пр.), наукометрические исследования.

# 1. ПЕРВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПЛАНИРОВАНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА В РОССИИ (1960–1980)

## 1.1. Методологические исследования

Для школы профессора В. В. Налимова всегда был характерен интерес к осмыслению философских аспектов планирования эксперимента. С самого начала оно рассматривалось с позиций философии науки. Математическая статистика внесла ряд общеметодологических концепций в теорию эксперимента. Это получение устойчивых частот, природа статистических выводов, концепции рандомизации, последовательного эксперимента, редукции информации, возможность представления результатов множеством моделей. Применение идей и методов планирования эксперимента резко сокращает число опытов, но главное – увеличивает четкость суждений экспериментатора и в этом – их эвристический смысл. Математическая статистика базируется на четких предпосылках, соответствующих некоторым идеализированным ситуациям. Математическая теория эксперимента выясняет, в какой степени идеи, развитые на основе этих идеальных представлений, можно применять в реальных экспериментальных условиях [24].

Важное значение имеет сравнение активного и пассивного эксперимента. В активном эксперименте исследователь вмешивается в поведение объекта исследования. В другом случае он пассивно наблюдает, как эксперимент «ведет» природа. В обоих случаях результаты можно представить одной и той же регрессионной моделью (Приложение 1). В активном эксперименте наблюдаемые переменные всегда выбираются так, что они практически не коррелированы с ненаблюдаемыми и поэтому оценки коэффициентов регрессии оказываются несмещенными. В пассивном эксперименте другая ситуация, что ведет к смещению оценок. Смещение может быть столь сильным, что регрессионный анализ иногда теряет всякий смысл.

Математическая теория эксперимента, формулируемая на языке математической статистики, становится метатеорией, так как в ней введены такие общие для всех экспериментаторов принципы, как принцип принятия решений в условиях неопределенности, принцип

обработки результатов наблюдений, принцип планирования эксперимента.

*«Этот язык удобен тем, что он позволяет описать отклик природы на деятельность экспериментатора в недетерминированной системе представлений, отражающей реальный мир, в котором оставлены степени свободы для вероятностного поведения» [24, с. 198].*

Внешне планирование эксперимента выглядит как математическая дисциплина, ее выводы формулируются на языке математики. Но здесь, как и в других разделах прикладной математики, исчезают целостные математические структуры, богатые логическими следствиями, которые из них могут быть выведены. Они заменяются в одном случае мозаикой критериев, в других – на математическом языке записываются высказывания, основанные на интуитивных ображениях. Тогда исчезает цепочка силлогизмов – один из обязательных внешних признаков традиционных математических построений.

В планировании эксперимента роль аксиом исполняют критерии оптимальности, основанные на интуитивном представлении о том, что есть хороший эксперимент (Приложение 1). Критерии оптимальности можно разделить на две группы: статические и динамические критерии.

*Статические критерии* отвечают определенным требованиям. Это задаваемое планом эксперимента расположение экспериментальных точек в пространстве варьируемых независимых переменных (факторов). Здесь теоремы – высказывания о свойствах плана, проверяемые путем доказательств. Конструктивной деятельности – поиску способов построения планов, оптимальных в том или ином смысле – часто предшествует доказательство ряда предварительных теорем. Критерии оптимальности образуют в общем случае мозаику взаимно несовместимых высказываний. Все же некоторые обобщения возможны выделением более сильных, иерархически выше стоящих критериев.

Поэтому возникла потребность в сопоставлении планов, порожденных разными критериями оптимальности. Можно определить численными методами, в какой степени план, порожденный одним критерием, оценивается с позиций других критериев. Иногда разумно остановиться на компромиссном решении, но для этого надо иметь сравнительные числовые оценки параметров планов. В межфакультетской лаборатории статистических методов МГУ такая работа была осуществлена.

Проведено сопоставление планов, часто используемых в прикладных задачах, по нескольким критериям оптимальности. Почти всегда для стандартных ситуаций можно найти планы с небольшим числом наблюдений, близкие к оптимальным. Далее решалась задача численного сопоставления планов по различным критериям и был разработан первый каталог оптимальных планов. Появилась возможность выбора компромиссных планов, достаточно хороших, но не наилучших с позиций разных критериев.

С помощью ЭВМ были построены **квази-D-оптимальные** планы с малым числом экспериментальных точек. Эффективность эксперимента заметно повысилась за счет использования всего пространства независимых переменных. С позиций D-оптимальности проведено сравнение ряда планов и показано, что линейные насыщенные планы тоже D-оптимальны. Отмечено существование структурных связей между латинскими квадратами и кубами, греко-латинскими квадратами и полным факторным экспериментом с дробными репликами. Латинские квадраты и кубы также оказались D-оптимальными [24, 25].

Вторая группа – *динамические критерии*. С их помощью решается задача выбора оптимальной стратегии в последовательно проводимой серии опытов. Выбор, например, важен при изучении биологической активности большого числа препаратов при наложении ограничения на число опытов. Требуется оценить оптимальность последовательности действий в проводимом эксперименте. При формулировке критериев оптимальности, исходя из интуитивных представлений, на математическом языке записываются полученные результаты. Здесь при решении проблемы выбора оптимальной стратегии обычно не удается разграничить аксиомы и логические следствия из них – теоремы. Выводится алгоритм, удобный для практического применения и соответствующий исходным положениям, но при этом теряется глубина логических построений. Множество возможных стратегий опять образует мозаику результатов, но не математическую структуру. Задача сравнения эффективных стратегий оказалась неразрешимой на уровне численного сопоставления.

В некоторых случаях, например при постановке отсеивающих экспериментов, возникают задачи смешанного типа, когда требуется оценить параметры модели и выполнить процедуру движения, уменьшив размер факторного пространства.

Таким образом, теорию эксперимента нельзя получить как логический вывод из начальных утверждений, образующих единую внут-

ренне непротиворечивую структуру. Это связано с невозможностью формализации всего процесса экспериментального исследования. Неформализованными остаются постановка задачи, выбор математической модели, выбор пространства независимых переменных и той области пространства, где будет проводиться эксперимент. Сильная теория создается для тех процедур эксперимента, которые представимы математическими моделями. Основная проблема – логическое осмысление той или иной постановки задачи. При успехе в ее решении можно обсуждать вопрос об оптимальности. Поэтому планирование эксперимента – это раздел знания, относящийся и к математической статистике, и к логике.

В связи с успехами в изучении критериев первой группы изменилась логика построения теории эксперимента. Она развивается по одним, математически обоснованным критериям, тогда как другие трудно обобщаемые критерии рассматриваются как «вспомогательные», хотя в ряде случаев они могут играть важную роль с позиции экспериментатора [13, 26].

Из других достижений в методологии получено обобщение теоремы об эквивалентности **D**- и **G**-оптимальных планов на случай линейных функционалов ковариационных матриц (**L**-оптимальность) и на случай выпуклых функционалов (**Ф**-оптимальность). Разработан алгоритм численного построения непрерывных **Ф**-оптимальных планов для любой линейной по параметрам модели и любой компактной области (В. В. Федоров). Получена строгая математическая постановка задачи выбора оптимальных действий для модели, неадекватно представляющей результаты эксперимента (С. М. Ермаков). Достигнут прогресс в решении задачи построения несмещенных планов с наименьшим числом точек спектра и минимизации случайной ошибки на множестве несмещенных планов (Е. В. Седунов).

Новые результаты получены в «классической» теории факторного планирования, часто используемой для независимых переменных с дискретными уровнями. Даны строгие определения «факторных» планов и «факторных» моделей. Рассмотрены модели нескольких типов, включающие как дискретные, так и непрерывные уровни факторов. Разработана классификация факторных планов и предложены методы построения эффективных планов для факторных моделей, учитывающие современные статистические критерии (В. З. Бродский).

В планировании отсеивающего эксперимента найдено соотношение между числом наблюдений, числом существенных эффектов и числом «подозреваемых» эффектов, с вероятностью построить план Саттерзвайта, выделяющий все существенные эффекты (Л. Д. Мешалкин).

С единых позиций рассмотрены разнородные результаты, полученные в теории отсеивающего эксперимента. Получены нижние оценки для числа опытов в различных постановках задачи отсеивания; доказательства существования планов при заданном числе опытов; удобные для анализа регулярные планы, содержащие умеренное число опытов; упрощенные процедуры анализа эксперимента, не требующие большого числа операций (М. Б. Малютов) [13].

Особое внимание уделено трудностям, возникающим при построении моделей, нелинейных по параметрам. Такие модели встречаются, например, в задачах химической кинетики. Здесь решается проблема оценки механизма промежуточных стадий, не наблюдаемых непосредственно в эксперименте. Из априорных сведений можно получить систему дифференциальных уравнений, описывающих механизм промежуточных реакций и задающих параметры модели. Эту систему можно рассматривать как исходную аксиоматику, позволяющую разложить наблюдаемые данные на составляющие их компоненты. При этом возникают трудности из-за воздействия трех источников неопределенности: 1) влияния случайной ошибки результатов наблюдений; 2) влияния неоднозначности оценивания параметров модели, вызванной сложностью процесса; 3) влияния различной формулировки химических аксиом, задающих набор промежуточных реакций.

Поэтому предлагается при изучении механизма явлений отказаться от поиска единственно верной модели, а представлять результаты множеством моделей. Причем само множество нелинейных по параметрам моделей можно представлять двумерными или трехмерными сечениями эллипсообразных фигур вместо матрицы независимых переменных и вектора результатов наблюдений. Такое исследование возможно в виде диалога человека с ЭВМ.

Свертывание информации через развернутое ее представление в решении задачи разложения наблюдений по задающим их механизмам – это, вероятно, новая парадигма в использовании моделей, нелинейных по параметрам [13].



Предпринимались попытки уменьшить неопределенности, связанные с первоначальной постановкой задачи, выбором модели, факторов и откликов. В связи с этим было предложено использовать для формализации задачи модель «черного ящика», заимствованную из кибернетики, а для выбора факторов и логики их отсеивания – был предложен метод априорного ранжирования факторов [18, 27].

Стоит отметить, что многие методологические исследования шли в русле мейнстрима мировой статистической мысли, а некоторые результаты существенно опережали общий ход мирового развития работ по планированию экспериментов. Вместе с тем и в мире, и у нас в стране наметился разрыв между теоретическими, методологическими и прикладными исследованиями. Видимо, в существовавшей тогда парадигме развития науки это было неизбежным, поскольку идея командной работы в науке еще не овладела массами. Может быть, наиболее яркий пример такого рода – исключение проблемы интерпретации результатов из сравнения критериев оптимальности планов. Между тем легкость интерпретации результатов настолько важна, что ортогональные и близкие к ним планы имеют на практике огромное преимущество перед планами, оптимальными по другим критериям. Конечно, сложности априорных представлений о моделях объектов часто вынуждают экспериментаторов скрепя сердце использовать неортогональные планы. А недостаточно глубокое понимание свойств различных критериев часто приводит к нарушению фундаментального принципа, известного как «бритва Оккама»: «Не увеличивай разнообразия сверх необходимого». То есть используйте всегда самый простой план, который не противоречит имеющимся априорным представлениям.

Стоит отметить, что ряд фундаментальных книг по планированию экспериментов до сих пор не переведены на русский язык. Тем не менее время от времени появлялись переводы зарубежных книг. Не претендуя на полноту списка, приведем все же некоторые примеры: Хикс Ч. «Основные принципы планирования эксперимента» [28]; Ч. Пирс «Полевые опыты с плодовыми растениями» [29]; Д. Финни «Введение в теорию планирования экспериментов» [30]; Л. Закс «Статистическое оценивание» [31]; К. Дэниел «Применение статистики в промышленном эксперименте» [32]; Дж. Клейнен «Статистические методы в имитационном моделировании» [33]; Н. Джонсон, Ф. Леон «Статистика и планирование эксперимента в науке и

технике» [34]. В это же время планирование экспериментов начало широко распространяться в странах социалистического лагеря. В результате начали появляться книги в Болгарии, ГДР, Польше и в других странах. Само по себе это явление заслуживает отдельного рассмотрения, мы же касаемся только появления совместных книг отечественных авторов с представителями этих стран. Приведем несколько примеров: К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер «Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов» [35]; А. Л. Митков, С. В. Кардашевский «Статистические методы в сельхозмашиностроении» [36]; Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов «Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов» [37].

Заметим еще, что всегда попадаются работы, которые выбиваются из общего ряда. Примером такого рода может служить книга: А. М. Длин «Факторный анализ в производстве» [38]. Автор описывает известные схемы факторных планов на языке, который в прошлом был принят в биологических приложениях статистики, но применительно к промышленным ситуациям.

## 1.2. Прикладные исследования

Интересно, что практически с самого начала отечественных исследований большое внимание уделялось обзорам и библиографиям. Собственно, первая публикация В. В. Налимова в журнале «Успехи химии» была обзором. Поэтому при рассмотрении прикладных исследований использовались обзоры [19, 39]; библиографические указатели, полученные с помощью Указателя научных ссылок (Science Citation Index, SCI) за 1966–1975 гг. [40–42]; библиографические указатели Государственной библиотеки им. В. И. Ленина [43–45]; библиографические указатели Московского энергетического института [46–48]. Публикации для обзоров отбирались как традиционными методами поиска, так и просмотром ссылок в 30 химических и металлургических журналах. В библиографии за 1966–1968 гг. на основе SCI использовались указатели ссылок, источников, пермутационный, корпораций [40]. Для «вхождения» в указатель были составлены списки: отечественных и зарубежных исследователей (активных работников в области планирования эксперимента); наиболее распространенных терминов; организаций, в которых проводились работы по теории и применению методов планирования эксперимента.