

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

В. Н. Кабанов, Ю. Н. Николаев

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БЕТОНОВ, СТРОИТЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ И СУХИХ СМЕСЕЙ

Учебно-практическое пособие



© Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Волгоградский государственный  
архитектурно-строительный университет», 2015

Волгоград. ВолгГАСУ. 2015

УДК 620.1:691.33(075.8)  
ББК 38.33-106.2я73  
К12

**Р е ц е н з е н т ы:**

доктор технических наук *О. В. Бурлаченко*,  
профессор кафедры технологий строительного производства  
Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета (ВолГАСУ);  
кандидат технических наук *С. Г. Абрамян*,  
профессор кафедры технологий строительного производства ВолГАСУ

*Утверждено редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебно-практического пособия*

**Кабанов, В. Н.**

К12 Экспериментальное исследование свойств бетонов, строительных растворов и сухих смесей [Электронный ресурс] : учебно-практическое пособие / В. Н. Кабанов, Ю. Н. Николаев ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. — Электронные текстовые и графические данные (3,6 Мбайт). — Волгоград : ВолГАСУ, 2015. — Учебное электронное издание сетевого распространения. — Систем. требования: PC 486 DX-33; Microsoft Windows XP; Internet Explorer 6.0; Adobe Reader 6.0. — Официальный сайт Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Режим доступа: <http://www.vgasu.ru/publishing/online/> — Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-98276-721-9

Представлены теоретические и методологические основы проведения экспериментальных исследований по изучению свойств бетонов и сухих строительных смесей. Рассмотрены технологические основы производства строительных работ с использованием бетонов и растворов, приготовленных на строительной площадке на основе сухих цементно-песчаных смесей. Приведены методические указания для самостоятельной научной экспериментально-исследовательской работы по изучению свойств цемента, тяжелых и легких бетонов, а также сухих цементно-песчаных смесей для приготовления бетонов и растворов на строительной площадке.

Для магистрантов очной формы обучения направления подготовки «Строительство».

Имеется печатный аналог (Кабанов, В. Н. Экспериментальное исследование свойств бетонов, строительных растворов и сухих смесей : учебно-практическое пособие / В. Н. Кабанов, Ю. Н. Николаев ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. — Волгоград : ВолГАСУ, 2015. — 112, [2] с.).

УДК 620.1:691.33(075.8)  
ББК 38.33-106.2я73

ISBN 978-5-98276-721-9



© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет», 2015

## Оглавление

Предисловие.....	6
<b>1. Теоретико-методологические основы и методы экспериментальных исследований.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1. Теоретические и методологические основы научно-экспериментальной деятельности.....</b>	<b>7</b>
1.1.1. Эксперимент, модель, теория и практика: соотношения в процессе познания.....	7
1.1.2. Основополагающие концепции математической теории эксперимента....	13
1.1.2.1. Концепция рандомизации.....	13
1.1.2.2. Концепция последовательного эксперимента.....	14
1.1.2.3. Концепция многофакторного эксперимента.....	15
1.1.2.4. Концепция редукции информации.....	16
<b>1.2. Методы планирования экспериментальных исследований.....</b>	<b>17</b>
1.2.1. Классификация методов планирования экспериментальных исследований.....	18
1.2.1.1. Планирование экспериментов, использующих метод дисперсионного анализа.....	19
1.2.1.2. Планирование факторных экспериментов.....	19
1.2.1.3. Планирование экспериментов по исследованию поверхности отклика.....	19
1.2.1.4. Планирование экспериментов при изучении математической модели, задающей механизм процесса.....	20
1.2.1.5. Планирование экспериментов при адаптационной оптимизации процессов (в условиях неуправляемого временного дрейфа).....	20
1.2.1.6. Планирование экспериментов при построении диаграмм «состав — свойство».....	21
1.2.1.7. Планирование отсеивающих экспериментов в технологических исследованиях.....	21
1.2.2. Основные типы задач и методов исследований.....	21
1.2.3. Методы планирования при решении экспериментальных задач первого типа.....	22
1.2.3.1. Планирование полного факторного эксперимента.....	23
1.2.3.2. Планирование дробного факторного эксперимента.....	25
1.2.3.3. Метод случайного баланса.....	26
1.2.3.4. Метод дисперсионного анализа.....	27
1.2.4. Методы планирования при решении экспериментальных задач второго типа.....	28
1.2.4.1. Метод Гаусса — Зайделя.....	30
1.2.4.2. Градиентные методы.....	31
1.2.4.3. Метод крутого восхождения (метод Бокса — Уилсона).....	31
1.2.4.4. Симплексный метод.....	31
1.2.4.5. Метод случайного поиска.....	32
1.2.5. Планирование экстремальных поисковых экспериментов при ограничениях.....	32
<b>1.3. Методы обработки и анализа экспериментальных данных.....</b>	<b>35</b>
1.3.1. Предварительный анализ экспериментальных данных.....	35
1.3.2. Методы построения математической модели исследуемого процесса или явления.....	37

1.3.3. Корреляционный анализ экспериментальных данных.....	39
1.3.3.1. Нахождение уравнения корреляционной связи.....	40
1.3.3.2. Установление тесноты линейной корреляционной связи между переменными.....	41
1.3.4. Регрессионный анализ экспериментальных данных.....	42
1.3.4.1. Оценка адекватности регрессионной модели.....	42
1.3.4.2. Оценка значимости коэффициентов регрессии.....	43
<b>2. Организационно-технологическое обеспечение производства строительных работ с применением бетонов и растворов, приготовленных на строительной площадке с использованием сухих цементно-песчаных смесей.....</b>	<b>44</b>
<b>2.1. Область применения и перспективы использования сухих цементно-песчаных смесей в строительном производстве.....</b>	<b>44</b>
<b>2.2. Организационно-технологические основы приготовления бетонов и растворов на строительной площадке с использованием сухой цементно-песчаной смеси.....</b>	<b>46</b>
<b>3. Методические рекомендации к проведению лабораторного практикума.....</b>	<b>53</b>
<b>3.1. Правила выполнения и оформления лабораторных работ.....</b>	<b>53</b>
<b>3.2. Стандартные методы исследования физико-механических свойств строительных материалов и образцов.....</b>	<b>56</b>
3.2.1. Определение истинной плотности песка.....	56
3.2.2. Определение истинной плотности цемента.....	57
3.2.3. Определение консистенции цементного раствора.....	58
3.2.4. Определение предела прочности при изгибе.....	58
3.2.5. Определение предела прочности при сжатии.....	59
3.2.6. Определение истинной плотности зерен щебня (гравия).....	60
3.2.7. Определение насыпной плотности зерен щебня (гравия).....	61
3.2.8. Определение пустотности щебня (гравия).....	61
3.2.9. Определение влажности щебня (гравия).....	61
3.2.10. Определение зернового состава щебня (гравия).....	62
3.2.11. Определение влажности песка.....	63
3.2.12. Определение насыпной плотности керамзита.....	63
3.2.13. Определение прочности керамзита.....	65
<b>3.3. Лабораторная работа 1. Экспериментальное определение технологических режимов для улучшения свойств минерального вяжущего (цемента).....</b>	<b>66</b>
3.3.1. Содержание и основные характеристики работы.....	66
3.3.2. Указания к выполнению экспериментальной части.....	69
3.3.2.1. Приборы и материалы, необходимые для проведения работы.....	69
3.3.2.2. Расчет расхода материалов.....	69
3.3.2.3. Планирование эксперимента.....	71
3.3.2.4. Определение консистенции цементного раствора.....	72
3.3.2.5. Методика проведения основного эксперимента.....	73
<b>3.4. Лабораторная работа 2. Экспериментальное определение продолжительности хранения сухой цементно-песчаной смеси.....</b>	<b>75</b>
3.4.1. Содержание и основные характеристики работы.....	75
3.4.2. Указания к выполнению экспериментальной части.....	76
3.4.2.1. Приборы и материалы, необходимые для проведения работы.....	76
3.4.2.2. Расчет расхода материалов.....	76

3.4.2.3. Планирование эксперимента.....	77
3.4.2.4. Определение консистенции цементного раствора.....	78
3.4.2.5. Методика проведения основного эксперимента.....	78
<b>3.5. Лабораторная работа 3. Экспериментальное исследование технологии использования сухой цементно-песчаной смеси для приготовления бетонов на строительной площадке.....</b>	<b>78</b>
3.5.1. Содержание и основные характеристики работы.....	78
3.5.2. Указания к выполнению экспериментальной части.....	79
3.5.2.1. Приборы и материалы, необходимые для проведения работы.....	79
3.5.2.2. Расчет расхода материалов.....	80
3.5.2.3. Планирование эксперимента.....	87
3.5.2.4. Методика проведения основного эксперимента.....	88
Список использованной литературы.....	92
Список рекомендованной литературы.....	92
Приложение 1. Пример оформления титульного листа лабораторной работы.....	94
Приложение 2. Таблицы для занесения экспериментальных данных.....	95
Приложение 3. Матрицы планирования экспериментов.....	96
Приложение 4. Вспомогательные данные для обработки результатов экспериментов методом наименьших квадратов.....	100
Приложение 5. Пример выполнения лабораторной работы.....	101

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В рамках магистерской подготовки, в сравнении с подготовкой бакалавров и инженеров, значительно больший упор делается на обеспечение самостоятельной познавательной и научно-исследовательской деятельности студентов. Наравне с решением задач освоения теоретических знаний и практического опыта в сфере монолитного строительства пособие направлено на обеспечение самостоятельной научно-исследовательской деятельности магистров в области экспериментального изучения свойств бетонов, строительных растворов и сухих смесей, а также их влияния на формирование организационно-технологических решений производства строительных работ.

Одним из основных преимуществ данной работы является ее междисциплинарный характер, когда сущность, технологические особенности производства строительных работ с применением бетона, железобетона, строительных растворов рассматриваются через исследование базовых свойств используемых в технологии монолитного строительства материалов (сухих цементно-песчаных смесей, строительных растворов, бетонов). Такой подход к изучению современных технологий монолитного строительства позволяет магистрам значительно быстрее и глубже познать организационно-технологические основы, которые во многом определяются свойствами используемых строительных материалов, технологическими режимами приготовления бетонов и строительных растворов, отвечающих заданным требованиям.

Все вышесказанное определяет логическую структуру содержания учебного пособия, включающего три основных главы:

1. Теоретико-методологические основы и методы экспериментальной деятельности.
2. Организационно-технологическое обеспечение производства строительных работ с применением бетонов и растворов, приготовленных на строительной площадке с применением сухих цементно-песчаных смесей.
3. Методические рекомендации к проведению лабораторного практикума по экспериментальному исследованию свойств бетонов, строительных растворов и сухих цементно-песчаных смесей.

Пособие отражает современный уровень научных знаний и практического опыта в сфере строительства из монолитного бетона и железобетона, а также в области организации экспериментальных исследований. Методические рекомендации к проведению лабораторного практикума по экспериментальному исследованию свойств бетонов, строительных растворов, сухих строительных смесей, вяжущих материалов соответствуют действующим в строительной сфере нормативно-техническим требованиям.

# **1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

## **1.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАУЧНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

### **1.1.1. Эксперимент, модель, теория и практика: соотношения в процессе познания**

Единство теоретической и экспериментальной деятельности реализуется в процессе познания, в интеграции специализированных видов деятельности. Однако экспериментальная деятельность всегда включает теоретическую, а теоретическая должна учитывать результаты экспериментов и наблюдений.

В ходе экспериментов и наблюдений получают множество данных. Их анализ предполагает, что речь идет о существенных данных, определяющих характер исследуемых объектов или процессов. Для того чтобы выявить существенное, необходимы теоретические представления, объясняющие на уровне гипотез возможные результаты экспериментов и наблюдений. Целе-направленный сбор существенных данных невозможен без теоретических рассуждений, так как недостатки в теории могут очень скоро превратиться в методологические ограничения при анализе данных.

Большое значение в процессе познания имеют редукции (упрощения). Важные формы научной редукции — сведение частного к общему, системы к элементам, высшего к низшему. Сведение частного к общему связано с выработкой общих теорий, которые объясняют множество результатов экспериментов и наблюдений, относящихся к частным аспектам исследуемой области.

Научно обоснованное сведение множества параметров к существенным, определяющим структуру системы, частного к общему — неотъемлемые составные части процесса научного познания. Пока это сведение остается в пределах точности, необходимой для практических целей, оно позволяет использовать результаты познания. Ориентация на более полный охват всех аспектов и сторон должна быть одновременно связана с требованием нахождения общих существенных отношений, т. е. законов данной области и установлением пределов сферы их действия.

Научно оправданная редукция подчинена определенным условиям, которые учитывают цель познания. Можно было бы подумать, что лучшей моделью объекта является сам объект. Однако это не так, поскольку модели представляют собой специфические средства познания, которые признаны служить теоретическому и практическому овладению объектом. Поэтому необходимо искать оптимальные модели, соответствующие этим целям. Слишком глобальные упрощения могут помешать овладению объектом, а отказ от упрощений нередко затрудняет процесс познания. Последнее означало бы требование описания объектов и процессов во всех их аспектах, что невозможно из-за неисчерпаемости связей. Поэтому научно оправданная редукция является важной составной частью практического и теоретического анализа.

Познание представляет собой единый процесс отражения опыта путем обобщения и разработки новых структур и функций в процессе творческой деятельности. Без познания продуктивно-творческой функции сознания невозможно понять значение моделирования. Человек использует отражение объективных законов и отношений для разработки идеальных программ своей деятельности для практического и теоретического освоения действительности. С помощью моделей проверяется возможность реализации тех или иных процессов, устанавливаются связи между различными теориями, синтезируются знания в целях выявления новых веществ, методов, создания новых системных структур.

Новый характер управления процессами и объектами в ходе практического и теоретического освоения общественной и природной реальности при определенных условиях и конкретных пространственно-временных отношениях может быть назван творческим.

Таким образом, модель играет чрезвычайно важную роль в познании, и значение моделирования для научного познания продолжает возрастать. Возникновение на основе существующих знаний творческих идей, связь образно-наглядных представлений с абстрактными понятиями, возможность реализации идей и идеальные программы предметной деятельности — все это тесно связано с моделированием.

Было бы упрощением сводить модель к отражению или воспроизведению объектов исследования. Процесс научного познания протекает в различных направлениях, и в зависимости от этого изменяются **функции модели**:

1. Использование модели как заменителя объекта, с тем чтобы в ходе эксперимента с этим квазиобъектом получить новые сведения о самом объекте. Здесь речь идет о материальных объектах и материальных моделях, причем теоретическое представление о модели, в которой содержится аналогия и гомология между моделью и объектом, является предпосылкой для поиска существующих и используемых в качестве модели объектов или для создания искусственной модели. Представление о модели является отражением связи между моделью и объектом. При проведении экспериментов мы

получаем новые знания, которые могут вести к созданию теории модели или, по крайней мере, представляют собой отражение структур и функций модели. Связанные с модельными представлениями теоретические знания могут, таким образом, стать составной частью теории объекта, причем должна быть осуществлена также проверка знаний о модели с точки зрения их значения для объекта. В случае модельных представлений процесс познания идет от экспериментов на модели к теоретическим знаниям о ней, которые на основе отраженных в модельных представлениях связей между объектом и моделью воспринимаются как отражение связей объекта, подлежащее, однако, дополнительной проверке.

2. Экспериментальная проверка творчески сконструированных теорий высокой степени обобщенности. В этом случае может вестись поиск модели общей теории, в которой систематизированы познанные закономерные связи при определенных краевых условиях, обеспечивающих экспериментальную проверку. Это явилось бы подтверждением теории и теоретической модели как отражения объективно-реальных связей.

3. Перевод экспериментально проверенных научных знаний в практическую сферу. Модели самого различного характера играют большую роль как с точки зрения проверки технической реализуемости, так и для учета естественных и общественных факторов. При этом речь идет не об анализе моделей как квазиобъектов и квазитеорий, который должен проводиться в процессе фундаментальных исследований, но о практическом и теоретическом синтезе знаний в целях комплексного решения практических проблем.

4. Установление соотношения опыта и теории. Опыт может вести к интуитивному постижению закономерных связей. Он дает материал для теоретического анализа, в результате которого относящиеся к частным моментам и тем самым необобщенные эмпирические знания поднимаются на уровень систематического познания законов.

*Модель* (от лат. *modulus* — мера) — интерпретация формализованного языка [1, с. 383]. Она представляет собой отображение, аналог явления или процесса в основных, существенных для целей исследования чертах. Соответственно, под моделированием понимается процесс создания моделей.

Мысленные модели как форма теоретического осмысления и отражения действительности играют большую роль в физическом познании. В этой связи важное теоретико-познавательное и методологическое значение приобретает вопрос о формировании моделей, использовании в познании, возможности их включения в более общие представления и их связи с другими формами познавательной деятельности — экспериментом, гипотезой, мысленным экспериментом, теориями.

Исследование соединительных звеньев (гипотез, моделей, мысленных экспериментов и т. п.), их формирования и взаимосвязей важно для вопроса о способе создания теорий и их интерпретаций, а также помогает понять диалектические взаимосвязи между познающим субъектом и познаваемым объектом.

На рис. 1 представлена схема, характеризующая соотношение основных элементов в структуре диалектического процесса познания.

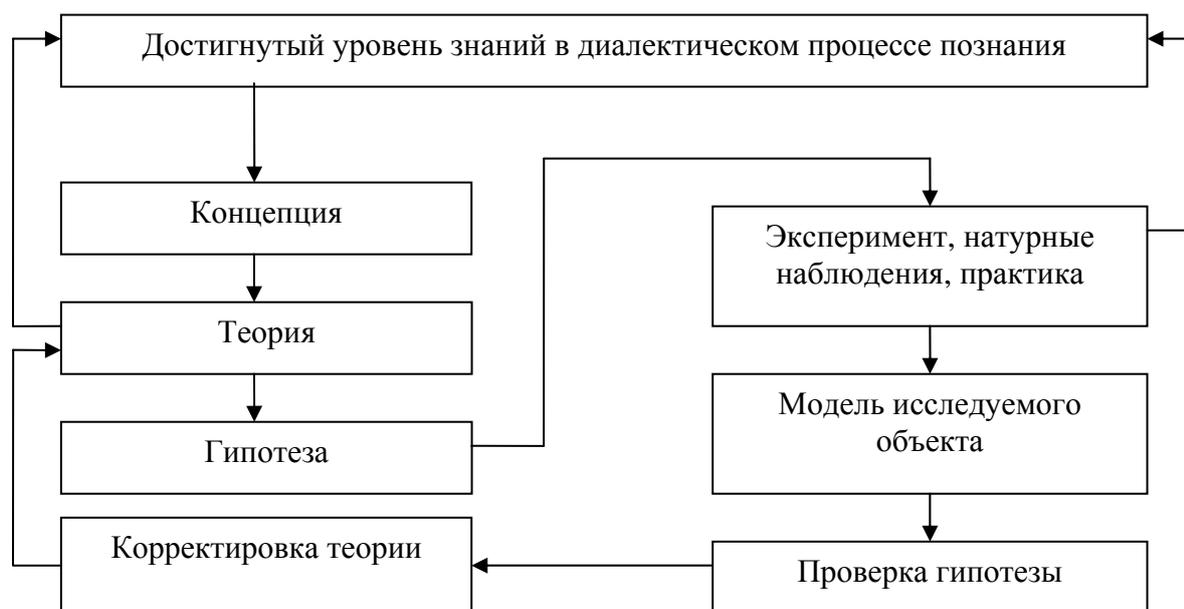


Рис. 1. Схематическое представление структуры диалектического процесса познания

Можно дать следующее рабочее определение мысленным и материальным моделям. **Моделью** является мысленно представленная или материально реализованная система, которая адекватно отражает объект исследования или аналогично воспроизводит специфические свойства и соотношения. Она должна быть в состоянии представить объект так, чтобы облегчить его изучение, обеспечить получение об этом объекте новых знаний, составление прогнозов, лучшее управление определенными явлениями или оптимизацию определенных объектов или процессов. Все это должно способствовать более полному овладению или эффективному использованию самого объекта или процесса или моделированию определенных свойств объекта (процесса).

Одной из форм моделей, широко используемых в познании сущности процессов и явлений, является математическая модель.

**Математическая модель** — приближенное описание какого-либо класса явлений внешнего мира, выраженное посредством математической символики [1, с. 343].

Анализ математических моделей позволяет проникнуть в сущность изучаемых явлений и является мощным методом познания внешнего мира, а также прогнозирования и управления. Процесс математического моделирования, т. е. изучения явлений с помощью математических моделей, можно подразделить на четыре этапа.

Первый этап — формулирование законов, связывающих основные объекты модели. Этот этап требует широкого знания фактов, относящихся к изучаемым явлениям, и глубокого понимания их в их взаимосвязях. Эта стадия завершается записью в математических терминах сформулированных качественных представлений о связях между объектами модели.

Второй этап — исследование математических задач, к которым приводят математические модели. На данном этапе решаются прямые задачи, направленные на получение в результате анализа выходных данных (теоретических следствий) для дальнейшего их сопоставления с результатами наблюдений изучаемых явлений. На этом этапе важное значение приобретает математический аппарат, необходимый для анализа математических моделей, и вычислительная техника как средство решения сложных математических задач.

Третий этап — выяснение того, удовлетворяет ли принятая гипотетическая модель критерию практики, т. е. согласуются ли результаты наблюдений с теоретическими следствиями модели в пределах точности наблюдений. Если модель была вполне определена (все ее параметры были заданы), то определение отклонений теоретических следствий от результатов наблюдений дает решения прямой задачи с последующей оценкой отклонений. Если отклонения выходят за пределы точности наблюдений, то модель не может быть принята. Часто при построении модели ее характеристики остаются неопределенными. Задачи, в которых характеристики модели (параметрические, функциональные) определяются таким образом, чтобы выходная информация была сопоставима в пределах точности наблюдений с результатами наблюдений изучаемых явлений, называются обратными задачами. Если математическая модель такова, что ни при каком выборе характеристик этим условиям нельзя удовлетворить, то модель не пригодна для исследования рассматриваемых явлений. Применение критерия практики к оценке математических моделей позволяет делать вывод о правильности положений, лежащих в основе изучаемой гипотетической модели.

Четвертый этап — последующий анализ модели в связи с накоплением данных об изучаемых явлениях и ее модернизация. В процессе развития науки и техники данные об изучаемых явлениях все более и более уточняются и наступает момент, когда выводы, получаемые на основании существующей математической модели, не соответствуют нашим знаниям о явлении. Таким образом, возникает необходимость построения новой, более совершенной (адекватной изучаемому явлению или процессу) математической модели.

Среди математических моделей выделяют так называемые модели прямой аналогии и модели-гипотезы (гипотетические модели).

**Модели прямой аналогии** — это такие модели, в которых соответствие между оригиналом и моделью известно и фиксировано в виде общей формулы, уравнения, выражающего закон определенного фрагмента, стороны действительности. Новая информация здесь выступает в виде частных случаев этого общего соотношения (закона) в зависимости от ограничений, связанных с выбором конкретных условий.

Для познания законов, которые нам неизвестны, строятся математические **модели-гипотезы** (математические гипотезы), которые, если их сопоставить с моделями прямой аналогии, нередко называют моделями непрямой аналогии или «рабочими» моделями.

Эти модели-гипотезы проверяются и уточняются в серии экспериментов, пока не удастся сформулировать общий закон.

**Гипотезы** отличаются от идеальных моделей, являющихся идеализированными объектами теории, и могут быть представлены как предварительная ступень или модель интерпретации теории, прежде всего благодаря своей функции в процессе познания — выступать в качестве научно обоснованного предположения о до сих пор неизвестных, недоступных или недостаточно изученных явлениях и процессах.

Гипотезы могут рассматриваться как предварительные ступени формирующихся моделей и в подобном качестве связаны с моделями. Отдельные научные гипотезы могут быть также сформулированы в виде моделей, которые являются предварительным этапом формирования теории или моделью ее интерпретации. В этом случае модели можно рассматривать как форму проявления гипотез на определенном ограниченном этапе в процессе создания теорий. Если же эта гипотеза подтверждена, то модель больше не носит гипотетического характера, но тем не менее остается идеализированным объектом теории.

Существуют определенные правила, которым должен следовать ученый при построении любой гипотезы. Гипотеза должна:

- 1) объяснять новые факты;
- 2) быть внутренне логически непротиворечивой и не противоречить никаким твердо установленным фактам;
- 3) быть эвристичной, т. е. предсказывать не наблюдавшиеся ранее явления;
- 4) быть принципиально проверяемой;
- 5) быть связанной со старыми знаниями принципом соответствия, т. е. должна включать старые знания в качестве предельного случая.

Различают разные этапы моделирования, однако в конкретном процессе исследования эти этапы не всегда могут быть достаточно четко выделены. Исходным пунктом является поиск модели или выработка представления о ней, создание первой исходной модели (эвристический этап). При этом поиск исходной модели вполне может основываться на уже существующей.

При разработке исходной модели большую роль играет интуиция исследователя. Продумывание возможностей, т. е. решение вопроса о том, какие модели могут быть выдвинуты на основе имеющихся фактов, экспериментальных данных, законов природы и логических правил, под которые подпадают исследуемые явления и процессы, представляют собой творческий этап моделирования. Вначале может выдвигаться большое количество моделей, однако в ходе исследования отбираются лишь те, которые удовлетворяют познанным или познаваемым в процессе исследования законам природы, а также законам и принципам создания модели. Выбор модели может осуществляться с применением математических вариационных методов.

Одной из форм работы с моделью является мысленный эксперимент. Иногда он называется также идеализированным экспериментом. Это специфическая форма умственной деятельности, в которой, как при создании гипотез, моделей, построении теорий, проявляется активный творческий

аспект человеческого мышления. В противоположность мысленному эксперименту реальные эксперименты всегда представляют единство теоретической и практической деятельности, которое заключается в том, что структура эксперимента и изменение объективных условий, целенаправленно предпринятые в экспериментальной ситуации, предварительно подготавливаются теоретически и затем осуществляются практически; результаты же реального эксперимента вновь подвергаются теоретическому анализу. В известной мере мысленный эксперимент представляет образное мысленное реконструирование определенных сторон реального эксперимента.

В процессе мысленного экспериментирования ограничиваются исследованием некоторых (иногда одной) существенных сторон объекта в идеальных или идеализированных условиях, абстрагируясь от несущественных взаимосвязей. В реальном эксперименте налицо как исследуемый объект с бесконечно многими количественными и качественными связями, так и условия опыта, при которых специальная экспериментальная ситуация не может быть полностью избавлена от мешающих воздействий, хотя в идеальном случае они могут быть сведены к минимуму.

### **1.1.2. Основополагающие концепции математической теории эксперимента**

Методология проведения экспериментальных исследований во многом определяется исходной концепцией математической теории эксперимента. Среди основополагающих концепций, имеющих в математической теории эксперимента специальное методологическое значение, выделяют следующие [2]:

- рандомизации;
- последовательного эксперимента;
- многофакторного эксперимента;
- редукции информации.

#### **1.1.2.1. Концепция рандомизации**

В современной науке исследователи часто сталкиваются со сложными системами, имеющими диффузный тип организации или нелинейные зависимости между основными параметрами. В этих случаях систематически действующие факторы (среди которых есть мешающие и не поддающиеся учету и контролю) можно условно интерпретировать как случайные величины, т. е. рандомизировать ситуацию эксперимента. При этом пробы и выборки являются случайными в пространстве и времени, а все члены совокупности, из которой берется выборка, имеют равные возможности попасть в эту выборку. Тем самым рандомизация повышает представительность выборки, объективность эксперимента.

Рандомизация характеризуется следующими преимуществами:

- 1) предохраняет от произвольных выборок, вносящих извне побочную регулярность, не имеющую места в действительности. Случайные выборки, составленные по таблице случайных чисел, исключают такой произвол;

2) при рандомизации эксперимента учитываются все факторы — и главные, и побочные, и мешающие — мерой рассеяния случайных величин, т. е. дисперсией. Исключить же мешающие факторы путем их стабилизации (как в классическом эксперименте) невозможно;

3) значительно расширяет и облегчает применимость методов математической статистики, так как изучаемые факторы, различные по своей физической природе, но рассматриваемые в качестве случайных величин, могут исследоваться теми же методами. Существенным является различие не в физической природе факторов, а в способах постановки задачи в зависимости от исходной (априорной) информации, т. е. различие типов статистических задач.

В зависимости от условий эксперимента на процедуру рандомизации накладываются различные ограничения, вследствие чего рандомизация принимает многообразные формы. Даже в рамках однофакторных экспериментов имеются планы полностью рандомизированные, рандомизированные блочные, планы типа латинского, греко-латинского квадрата и пр.

### **1.1.2.2. Концепция последовательного эксперимента**

Это пошаговая стратегия, когда каждый последующий шаг эксперимента зависит от результатов анализа предыдущего шага. Концепция пошагового эксперимента создана в 1943 г. А. Вальдом, который показал эффективность и сходимости последовательного анализа, сформулировав правило завершения эксперимента, близкого к оптимальному. Он также ввел последовательный критерий отношений вероятностей, обеспечивающий принятие решений о выборе между двумя конкурирующими гипотезами.

Кроме метода последовательного анализа, к пошаговой стратегии относятся: метод последовательной стохастической аппроксимации, динамического программирования, а также статистические методы распознавания, такие как метод последовательных решений, последовательного обучения по Байесу, метод перцептрона Ф. Розенблатта, метод потенциальных функций, метод итерационных рекуррентных алгоритмов самообучения Цыпкина и др.

Концепция пошаговой стратегии доказала свою эффективность в планировании экстремальных экспериментов. В зависимости от результатов анализа предыдущего шага исследователь применяет разнообразные методы: линейного приближения, градиентный метод, метод наискорейшего спуска, поиска по наилучшей пробе, описания полиномами второго, а иногда и третьего порядка и пр.

Преимущество этой стратегии состоит в том, что те сложные задачи, которые не поддаются аналитическим методам решения, например в виде составления и решения дифференциальных уравнений, могут быть решены методами пошаговой стратегии. При этом важным свойством является разделимость таких задач на последовательные этапы.

Идея последовательного приближения заключается в приближении от менее определенной ситуации к более определенной, конкретной.

Для примера представим методологические основания метода восхождения.

Первая особенность метода состоит в том, что, несмотря на абстрактность более ранних шагов анализа, сохраняется ориентация на целое. Каждая категория или абстракция должна в процессе восхождения осознаваться и по возможности формально эксплицироваться как одностороннее отображение целого, как одна из его проекций. При этом экспликация самого характера и вида односторонности и есть вместе с тем выявление направленности на целое, подобно тому как отклонение адаптивной системы от нормы есть стимул ее возвращения к норме. В сложных статистических задачах, решаемых методом последовательных приближений, также необходим критерий (ориентирующий показатель) и механизм его реализации на каждом шаге приближения. Таким механизмом выступает обратная связь от результата каждого шага к схеме целостного объекта, с которым сравнивается результат каждого шага, как с целевым ориентиром, и корректируется направление дальнейшего решения.

Этот ориентир выявляется, уточняется благодаря второй особенности метода восхождения. Она заключается в том, что в процессе восхождения выбирается наиболее определенное звено для каждого шага восхождения. С точки зрения вероятностно-статистических методов на каждом шаге отыскивается звено с наибольшей вероятностью и наименьшей энтропией. Тогда процесс преодоления исходной неопределенности и есть процесс перехода (восхождения) от одной абстрактной (односторонней) неопределенности к другой, пошаговый синтез конкретного целого из его абстрактных моментов.

Единство представленных выше двух особенностей метода восхождения служит методологическим критерием для оценки каждого шага и ориентиром для дальнейшего движения к цели. А тот факт, что вероятностно-статистические методы позволяют оценивать степень неопределенности (определенности) каждого шага последовательного приближения величинами, связанными с вероятностью (плотностью распределения вероятностей, величиной среднего риска, средних потерь, вероятностью ошибки и т. д.), позволяет метод восхождения использовать как методологический, который непосредственно связан с соответствующим математическим аппаратом.

### **1.1.2.3. Концепция многофакторного эксперимента**

В традиционном эксперименте, когда удается выделить нужные факторы и элиминировать мешающие путем их стабилизации, интересующие исследователя факторы варьируются поочередно. Однако сложно организованные диффузные системы с большим числом независимых переменных не поддаются экспериментированию по такой схеме.

Стратегия многофакторного эксперимента состоит в том, что варьируются все переменные сразу и каждый эффект оценивается по результатам всех опытов, проведенных в данной серии экспериментов. Это уменьшает дисперсию оценки по сравнению с дисперсией единичного измерения. Была разработана сложная система критериев оптимальности ( $D$ -,  $A$ -,  $E$ -,  $G$ -оптимальности), позволившая наилучшим образом использовать совокупность независимых переменных. При этом выделилось два подхода, два направления в планировании эксперимента.

Первое — эмпирико-интуитивное направление Бокса и Уилсона — сложилось при решении задачи по отысканию оптимальных условий протекания процессов. Однако в результате выхода работ по методологии планирования эксперимента выяснилось, что при переходе к планам второго порядка нарушается принцип оптимального использования пространства независимых переменных. Тем самым была обнаружена ограниченность и в ряде случаев несостоятельность эмпирико-интуитивного подхода в исследовании сложных систем.

Второе направление в планировании эксперимента, связанное с именем Кифера, заключается в оптимизации процесса планирования.

#### **1.1.2.4. Концепция редукции информации**

Результаты экспериментов, особенно со сложными системами, необходимо представлять в компактной и стандартизированной форме. Такая редукция информации диктуется еще и тем, что множество данных — результатов экспериментов — вводится в ЭВМ, хранится и автоматически сопоставляется с другими данными.

В связи с этим существуют требования, связанные с редукцией информации.

Во-первых, это требование соизмеримости (сопоставимости, относительной однородности) сравниваемых данных. Оно вытекает из важнейшей характеристики образа, знания его качественной разнородности (однородности) по тем или иным свойствам и отношениям. Нарушение требования сопоставимости сравниваемых фрагментов знания приводит к грубым ошибкам. Данное требование можно проиллюстрировать следующими примерами. Обработка измерения предполагает их однородность, т. е. все переменные должны быть измерены в системе тех же единиц. Для вычисления средней дисперсии необходимо, чтобы выборочные дисперсии были однородны, т. е. подсчитаны по выборкам, относящимся к одной и той же генеральной совокупности.

Во-вторых, требование конкретности истины, означающее, что те или иные понятия, оценки имеют определенную область своей применимости. При выходе за ее границы они лишаются смысла, возникают «расходимости» (бесконечные значения переменных) и другие формальные показатели обесценения понятий.

В-третьих, требование максимальной информационной емкости, которое конкретизируется в следующих статистических требованиях:

эффективности оценок, т. е. минимальности дисперсии отклонения относительно неизвестного параметра;

состоятельности оценок, когда при увеличении числа наблюдений оценка параметра стремится к его истинному значению;

несмещенности оценок, т. е. отсутствии систематических ошибок в процессе вычисления параметров.

## 1.2. МЕТОДЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Практические научные исследования, особенно в начальной стадии постановки задачи и определения граничных значений эксперимента, связаны с использованием математических методов планирования. Планирование эксперимента является одним из основных разделов математической теории эксперимента.

*Планирование эксперимента* — раздел математической статистики, изучающий рациональную организацию измерений, подверженных случайным ошибкам [1, с. 458].

*Фактор* — причина, движущая сила какого-либо процесса или явления, определяющая его характер или отдельные черты. В статистике под фактором понимается причина, находящаяся в определенной логической связи со следствием. Как статистическая величина, фактор — числовая величина, находящаяся в количественно определенной взаимосвязи с другим показателем, часто называемым результативным. В математической статистике в таких случаях показатели-факторы называют *независимыми переменными* или *факторными признаками*, а результативный показатель — *зависимой переменной-откликом* или *результативным признаком*.

Под *планом эксперимента* понимается совокупность значений, задаваемых переменной  $x$  в эксперименте.

*Критерий оптимальности* — количественный показатель, выражающий меру эффекта принимаемого решения (меру достижения цели) для сравнительной оценки возможных решений (альтернатив) и выбора наилучшего. Требования максимизации (минимизации) значений одной или нескольких числовых функций, значения которых выражают меру (степень) осуществления целей, называются *целевыми функциями* [1, с. 249].

Планирование эксперимента применяется при проведении поисковых исследований, при неполном знании механизма явления или процесса, подтверждении или уточнении параметров уже известных математических описаний этих явлений.

Оптимальная организация исследований позволяет уменьшить количество опытов, сократив тем самым расходы на их проведение и время на обработку данных, снизить вероятность ошибки эксперимента, выработать четкие формализованные правила принятия решения на каждом этапе проведения эксперимента и получить многофакторные модели с желаемыми статистическими свойствами.

*Стратегия экспериментирования* определяется требованиями, предъявляемыми к модели, и заключается в выборе соответствующего плана размещения экспериментальных точек в заданной области факторного пространства исходя из критериев оптимальности.

Критерии оптимальности планирования характеризуют качество плана, точность линейных оценок параметров модели и предсказательные свойства модели в целом.

### 1.2.1. Классификация методов планирования экспериментальных исследований

*Процесс планирования эксперимента* — это оптимальное управление экспериментом при неполном знании механизма процессов и явлений.

Начало теории планирования эксперимента положили труды Р. Фишера (1935 г.), подчеркнувшего, что рациональное планирование эксперимента дает не менее существенный выигрыш в точности оценок, чем оптимальная обработка результатов эксперимента [1, с. 458].

Как правило, эксперименты проводятся небольшими сериями по заранее составленному алгоритму, оптимальному в некотором строго сформулированном смысле. После каждой небольшой серии опытов производится обработка результатов наблюдений и принимается строго обоснованное решение о дальнейших действиях. При выборе алгоритма планирования эксперимента, естественно, учитывается цель исследования и априорная информация о механизме изучаемого процесса или явления. Критерий оптимальности планирования выбирается так, чтобы он хорошо соответствовал интуитивным представлениям экспериментаторов.

Обычно рассматривается следующая схема планирования эксперимента.

Со случайными ошибками измеряется функция  $f(\theta, x)$ , зависящая от неизвестных параметров  $\theta$  (числовых или векторных) и от переменных факторов  $x$ , которые по выбору экспериментаторов могут принимать значения из некоторого допустимого множества  $X$ .

Целью эксперимента является обычно либо оценка параметров  $\theta$  или их функций, либо проверка некоторых гипотез о параметрах  $\theta$ .

Исходя из цели эксперимента формулируется критерий оптимальности плана эксперимента. Как правило, оценки параметров  $\theta$  ищут по методу наименьших квадратов, а гипотезы о параметрах  $\theta$  проверяют с помощью критерия Фишера  $F$ . В обоих случаях при этом оказывается естественным выбирать в качестве критерия оптимальности плана с заданным числом экспериментов некоторую функцию от дисперсий и коэффициентов корреляции оценок метода наименьших квадратов. В случае когда  $f(\theta, x)$  линейно зависит от  $\theta$ , оптимальный план можно построить до проведения эксперимента, в других случаях план эксперимента уточняется по ходу.

Можно выделить несколько направлений планирования эксперимента. Факторное было связано с агробиологическими применениями дисперсионного анализа, что нашло отражение в сохранившейся терминологии. Здесь функция  $f(\theta, x)$  зависит от вектора  $x$  переменных (факторов) с конечным числом возможных значений и характеризует сравнительный эффект значений каждого фактора и комбинаций различных факторов. Алгебраическими и комбинаторными методами были построены интуитивно привлекательные планы, одновременно сбалансированным образом изучающие влияние по возможности большего числа факторов. Построенные планы оптимизируют

некоторые естественные характеристики оценок метода наименьших квадратов. Под влиянием приложений в химии и технике развивалось планирование эксперимента по поиску оптимальных условий протекания процессов. По существу эти методы являются модификацией обычных численных методов поиска экстремума с учетом случайных ошибок измерений.

Специфическими методами обладает планирование отсеивающих экспериментов, в которых нужно выделить те компоненты вектора  $x$ , которые сильнее всего влияют на функцию  $f(\theta, x)$ , что важно на начальной стадии исследования, когда вектор  $x$  имеет большую размерность.

Планирование эксперимента можно рассматривать как одно из направлений кибернетики. Возможность управления сложными системами при неполном знании механизма явлений — это одно из основных положений кибернетики.

В зависимости от характера исследуемых процессов и явлений, а также целей исследования существуют различные подходы к планированию эксперимента, которые рассмотрены ниже.

### ***1.2.1.1. Планирование экспериментов, использующих метод дисперсионного анализа***

Планирование эксперимента с использованием методов дисперсионного анализа стало стандартным приемом в тех случаях, когда нужно отдельно оценить рассеяние, обусловленное различными источниками. Задача формулируется следующим образом: необходимо предложить такую схему расположения опытов, которая позволит разложить суммарную дисперсию на отдельные составляющие. Решается эта задача с помощью методов дисперсионного анализа.

### ***1.2.1.2. Планирование факторных экспериментов***

Задача ставится следующим образом: нужно оценить линейные эффекты и эффекты взаимодействия при большом числе независимых переменных. В многофакторных экспериментах, в отличие от классического однофакторного, варьируют одновременно всеми переменными (факторами) сразу. При этом резко повышается эффективность эксперимента. Каждым переменным варьируют на двух или иногда на трех уровнях.

Используемые методы исследования:

- планирования полного и дробного факторного эксперимента;
- регрессионного анализа;
- корреляционного анализа;
- дисперсионного анализа;
- другие методы факторного анализа.

### ***1.2.1.3. Планирование экспериментов по исследованию поверхности отклика***

Это направление можно рассматривать как дальнейшее развитие методов многофакторного эксперимента. Задача здесь формулируется следующим образом: варьируя многими независимыми переменными, нужно найти

оптимальный состав многокомпонентной системы или оптимальные условия протекания какого-либо процесса (например, технологического) в условиях, когда аналитическое выражение функции отклика неизвестно.

Используемые методы экспериментальных исследований:  
планирования экстремальных поисковых экспериментов Гаусса — Зайделя;  
градиентные (обычный и метод Кифера — Вольфовица);  
крутого восхождения (метод Бокса — Уилсона) — синтез градиентного метода и метода Гаусса — Зайделя;  
симплексный;  
случайного поиска;  
локальное линейное приближение поверхности отклика;  
движение по градиенту линейного приближения;  
описание почти стационарной области полиномами второго, третьего и высшего порядков;  
планирование, ортогональное к неконтролируемому временному дрейфу;  
другие методы планирования экстремальных поисковых экспериментов.

#### **1.2.1.4. Планирование экспериментов при изучении математической модели, задающей механизм процесса**

Здесь возможны различные формулировки задачи. Нередко математическая модель задается исходя из некоторых априорных соображений. Исследователю нужно показать, что она адекватно описывает результаты эксперимента.

Иногда задача ставится следующим образом: нужно найти оптимальную стратегию для уточнения числовых значений параметров функции, аналитическое значение которой известно.

Часто оказывается выгодным применять последовательное планирование, при котором результаты первой серии используются для улучшения плана последующих серий.

Используемые методы:

планирования полного и дробного факторного эксперимента с использованием упрощенного математического аппарата обработки данных (получения линейной и неполной степенной математической модели статистики сложных объектов);  
наименьших квадратов;  
регрессионного и корреляционного анализа.

#### **1.2.1.5. Планирование экспериментов при адаптационной оптимизации процессов (в условиях неуправляемого временного дрейфа)**

Задача ставится следующим образом: в сложных производственных условиях необходимо непрерывно экспериментировать, чтобы приспособиться к изменяющимся условиям (непрерывный временной дрейф экстремума).

При проведении производственных экспериментов приходится иметь дело с большим шумовым полем, на фоне которого нужно выделить слабые сигналы, варьируя независимыми переменными в очень узком интервале (варьирование в широком интервале может привести к браку дорогостоящей продукции).

В рамках поставленной задачи применяются следующие методы:  
планирования эксперимента в условиях дискретного дрейфа;  
планирования эксперимента в условиях непрерывного линейного дрейфа;  
планирования эксперимента в условиях экспоненциального дрейфа.

### **1.2.1.6. Планирование экспериментов при построении диаграмм «состав — свойство»**

Задача формулируется следующим образом: нужно найти оптимальное в некотором смысле расположение точек в факторном пространстве для полиномиального описания диаграммы «состав — свойство». При полном описании этой диаграммы приходится иметь дело с очень сложными поверхностями отклика.

Используются следующие методы:  
полиномиального описания поверхности отклика;  
линейной алгебры и многомерной геометрии.

### **1.2.1.7. Планирование отсеивающих экспериментов в технологических исследованиях**

Задача ставится так: в сложных и плохо изученных процессах надо выделить доминирующие эффекты среди очень большого числа эффектов, взятых под подозрение. Особенность этого метода состоит в том, что на первых этапах исследования число эффектов, подлежащих обследованию, может быть больше числа опытов (число степеней свободы меньше нуля).

Используются следующие методы:  
регрессионного и корреляционного анализа;  
последовательного отсеивания незначительных факторов;  
случайного баланса.

## **1.2.2. Основные типы задач и методов исследований**

Количество возможных задач и методов экспериментальных исследований достаточно велико, но среди них можно выделить два основных типа:

- 1) задачи и соответствующие им методы экспериментальных исследований с получением математической модели изучаемого процесса или явления;
- 2) задачи и методы нахождения и поддержания наилучших значений целевой функции без построения математической модели исследуемого процесса или явления.

На рис. 2 представлена классификация основных типов задач экспериментальных исследований и используемых при этом методов планирования исследований и обработки экспериментальных данных.



Рис. 2. Математические методы планирования эксперимента и обработки экспериментальных данных

### 1.2.3. Методы планирования при решении экспериментальных задач первого типа

Процесс решения задачи получения математической модели, описывающей механизм исследуемого процесса или явления, состоит из следующих этапов:

- 1) планирование эксперимента;
- 2) проведение эксперимента на объекте исследований;
- 3) проверка воспроизводимости эксперимента;
- 4) получение математической модели объекта с проверкой статистической значимости выборочных коэффициентов регрессии;
- 5) проверка адекватности математического описания.

При планировании экспериментальных исследований с целью получения математической модели процесса или явления наиболее часто используются метод полного факторного эксперимента, дробного факторного эксперимента и метод случайного баланса.

### 1.2.3.1. Планирование полного факторного эксперимента

Для построения линейных и неполных степенных математических моделей применяется полный факторный эксперимент, обладающий ортогональной матрицей планирования.

**Полным факторным экспериментом** (ПФЭ) называется эксперимент, реализующий все возможные неповторяющиеся комбинации некоторого числа уровней независимых управляемых факторов, каждый из которых варьируется на нескольких уровнях (двух, трех, пяти). Число этих комбинаций  $N = 2^n, 3^n, 5^n$  определяет тип ПФЭ.

Для упрощения дальнейшее изложение построим на примере планирования типа  $3^n$ , т. е. на примере объекта с тремя ( $n = 3$ ) независимыми управляемыми факторами  $x_1, x_2, x_3$ . Математическое описание поверхности отклика объекта в окрестности точки базового режима  $(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})$  в таком случае можно получить варьированием каждого из факторов на трех уровнях, отличающихся от базового уровня на величину интервала варьирования  $\Delta x_i$ . Интервал варьирования по каждому управляемому фактору выбирают так, чтобы приращение величины отклика  $y$  к базовому значению  $y_0$  при реализации  $x_{i0} \pm \Delta x_i$  можно было выделить на фоне «шума» при небольшом числе параллельных опытов.

При планировании эксперимента проводят преобразование размерных управляемых независимых факторов  $x_i$  в безразмерные, нормированные  $z_i$ :

$$z_i = (x_i - x_{i0}) / \Delta x_i. \quad (1)$$

Это дает возможность легко построить ортогональную матрицу планирования (МП). В случае планирования типа  $3^n$  значения управляемых переменных в относительных единицах будут равны  $-1, 0, +1$  соответственно на нижнем, основном и верхнем уровне для всех переменных независимо от физической природы факторов, значений основных уровней и интервалов варьирования факторов  $\Delta x_i$ .

Если для проведения эксперимента применяется полный факторный эксперимент типа  $3^n$ , то планирование осуществляется на трех уровнях изменения управляемых переменных факторов — верхнем (+1), основном (0) и нижнем (-1). Верхний и нижний отстоят от основного на одинаковую величину, называемую **интервалом варьирования**. Значения факторов сводятся в табл. 1.

Как уже было сказано, планирование по методу ПФЭ осуществляется полным перебором всех возможных взаимодействий факторных признаков. В план эксперимента включаются еще минимум два опыта в одной из точек плана для подсчета в дальнейшем дисперсии воспроизводимости эксперимента.

Пример плана проведения полного трехфакторного эксперимента при трех уровнях исследования каждого фактора представлен в табл. 1.

Таблица 1

## Основные характеристики плана эксперимента

Характеристика	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Основной уровень	$X_{0,1}$	$X_{0,2}$	$X_{0,3}$
Интервал варьирования	$\Delta X_1$	$\Delta X_2$	$\Delta X_3$
Верхний уровень	$X_{1 \max} = X_{0,1} + \Delta X_1$	$X_{2 \max} = X_{0,2} + \Delta X_2$	$X_{3 \max} = X_{0,3} + \Delta X_3$
Нижний уровень	$X_{1 \min} = X_{0,1} - \Delta X_1$	$X_{2 \min} = X_{0,2} - \Delta X_2$	$X_{3 \min} = X_{0,3} - \Delta X_3$

Матрицу планирования (МП) составляют по следующим правилам:

1. Каждая  $g$ -я строка матрицы содержит набор координат  $z_{ig}$  точки, в которой проводится  $g$ -й опыт ( $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $g = 1, 2, \dots, N$ ).

2. В первой строке все управляемые факторы выбирают на нижнем уровне, т. е.  $z_i = -1$ . Последующие  $g$ -е варианты варьирования при составлении МП выбирают следующим образом: при построчном переборе всех вариантов частота смены уровня изменения управляемых переменных для каждого последующего фактора  $z_{i+1}$  вдвое меньше, чем для предыдущего (табл. 2). Варьирование производится на трех (или более) уровнях по усмотрению исследователя.

3. В план эксперимента включаются еще минимум два опыта в одной из точек плана для подсчета в дальнейшем дисперсии воспроизводимости эксперимента. В табл. 2 такой точкой является опыт № 14.

Таблица 2

План проведения эксперимента типа  $3^3$ .

Число опытов	Номер опыта	Матрица планирования	Результативные признаки	Число	Номер
		$X_1$	$X_2$		
29	1	+1	+1	+1	$y_1$
	2	+1	+1	0	$y_2$
	3	+1	+1	-1	$y_3$
	4	+1	0	+1	$y_4$
	5	+1	0	0	$y_5$
	6	+1	0	-1	$y_6$
	7	+1	-1	+1	$y_7$
	8	+1	-1	0	$y_8$
	9	+1	-1	-1	$y_9$
	10	0	+1	+1	$y_{10}$
	11	0	+1	0	$y_{11}$
	12	0	+1	-1	$y_{12}$
	13	0	0	+1	$y_{13}$
	14.1	0	0	0	$y_{14.1}$
	14.2	0	0	0	$y_{14.2}$
	14.3	0	0	0	$y_{14.3}$
	15	0	0	-1	$y_{15}$
	16	0	-1	+1	$y_{16}$
17	0	-1	0	$y_{17}$	
18	0	-1	-1	$y_{18}$	

Число опытов	Номер опыта	Матрица планирования	Результативные признаки	Число	Номер
		$X_1$	$X_2$		
29	19	-1	+1	+1	$y_{19}$
	20	-1	+1	0	$y_{20}$
	21	-1	+1	-1	$y_{21}$
	22	-1	0	+1	$y_{22}$
	23	-1	0	0	$y_{23}$
	24	-1	0	-1	$y_{24}$
	25	-1	-1	+1	$y_{25}$
	26	-1	-1	0	$y_{26}$
	27	-1	-1	-1	$y_{27}$

### 1.2.3.2. Планирование дробного факторного эксперимента

Во многих практических задачах идентификации влияние взаимодействий (произведений факторов) второго и высших порядков отсутствует или пренебрежительно мало. Кроме того, на первых этапах исследования часто нужно получить в первом приближении лишь линейную аппроксимацию изучаемого уравнения связи при минимальном количестве опытов. В этом случае более целесообразным является проведение дробного факторного эксперимента.

*Дробным факторным экспериментом* (ДФЭ) называется эксперимент, реализующий часть (дробную реплику) полного факторного эксперимента. ДФЭ позволяет получить линейное приближение искомой функциональной зависимости в некоторой небольшой окрестности точки базового режима. При этом достигается минимальное число опытов.

Наиболее распространенным методом построения дробного плана факторного эксперимента является перебор значений переменных факторов только на границах их исследования (на верхнем и нижнем уровне).

В одной из точек эксперимента проводится три опыта, что необходимо для определения дисперсии воспроизводимости эксперимента.

МП составляют по следующим правилам:

1. Каждая  $g$ -я строка матрицы содержит набор координат  $z_{ig}$  точки, в которой проводится  $g$ -й опыт ( $i = 1, 2, \dots, n; g = 1, 2, \dots, N$ ).

2. В первой строке все управляемые факторы выбирают на нижнем уровне, т. е.  $z_i = -1$ . Последующие  $g$ -е варианты варьирования при составлении МП выбирают следующим образом: при построчном переборе всех вариантов частота смены уровня изменения управляемых переменных для каждого последующего фактора  $z_{i+1}$  вдвое меньше, чем для предыдущего (см. табл. 2). Варьирование управляемых факторов происходит на двух уровнях +1 и -1.

3. В план эксперимента добавляются три опыта на основном уровне (в табл. 3 это точки плана 9.1 — 9.3).

Сокращенный план проведения эксперимента типа  $2^3$ 

Номер опыта	Факторные признаки			Результативные признаки
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_i$
1	+1	+1	+1	$y_1$
2	+1	+1	-1	$y_2$
3	+1	-1	+1	$y_3$
4	+1	-1	-1	$y_4$
5	-1	+1	+1	$y_5$
6	-1	+1	-1	$y_6$
7	-1	-1	+1	$y_7$
8	-1	-1	-1	$y_8$
9.1	0	0	0	$y_{9.1}$
9.2	0	0	0	$y_{9.2}$
9.3	0	0	0	$y_{9.3}$

В прил. 3 представлены матрицы планирования для полных факторных экспериментов типа  $3^2$ ,  $3^3$ ,  $3^4$ ,  $3^5$ ,  $3^6$ , а также матрицы планирования для сокращенных факторных экспериментов типа  $2^2$ ,  $2^3$ ,  $2^4$ ,  $2^5$ ,  $2^6$ .

### 1.2.3.3. Метод случайного баланса

При проведении экспериментальных исследований основным этапом является получение математической модели, адекватно описывающей изучаемый процесс (явление) в изучаемом диапазоне изменения его входных переменных (факторов). При этом естественно стремиться к тому, чтобы математическое описание было как можно более простым при максимуме подобия, особенно при разработке способов и систем оптимального управления, когда важно достичь или поддерживать глобальный, а не локальный или частный экстремум.

Однако решение этой задачи в реальных условиях обычно связано с серьезными трудностями, вызванными весьма большим количеством переменных, в той или иной степени влияющих на объект. Методика регрессионного анализа основана на предположении, что учтены все или, по крайней мере, все существенные факторы. В противном случае полученная математическая модель окажется неадекватной в изучаемом диапазоне изменения переменных.

Привлечение большого числа переменных к составлению математического описания может потребовать непомерного объема экспериментальной и вычислительной работы, что зачастую невыполнимо в силу технологических, экономических и прочих ограничений. Возникает необходимость предварительного отсеивания несущественных переменных и выделения воздействий (факторов), которые оказывают наиболее заметное влияние на целевую функцию (отклик).

Если число всех возможных факторов, влияющих на объект, не превышает 6—7, то для предварительного изучения объекта можно применить методы дробного или полного факторного эксперимента. Однако при большем

числе факторов методы ПФЭ и ДФЭ, предназначенные для тщательного изучения поверхности отклика, оказываются слишком громоздкими и трудоемкими для постановки отсеивающих опытов.

Если наложить ограничения при самой постановке задачи, то можно снизить число таких опытов. Метод случайного баланса (МСБ) использует перенасыщенные планы.

Важнейшей теоретической предпосылкой МСБ является априорное знание того, что из всей совокупности рассматриваемых переменных только небольшое их число являются действительно существенными, остальные же могут быть отнесены к так называемому шумовому полю.

#### **1.2.3.4. Метод дисперсионного анализа**

Во многих областях практической деятельности встречаются объекты исследования, состояние которых определяется входными переменными (факторами), не имеющими количественного описания. Такими факторами могут быть неуправляемые и управляемые переменные, уровни варьирования которых можно произвольно выбирать и фиксировать во времени.

Для изучения влияния факторов подобного рода на выходную функцию объекта (отклик), их общего оценивания, ранжирования и выделения среди них существенных, очевидно, непригодны все методы отсеивания управляемых количественных факторов, поскольку эти методы предусматривают измерение уровней исследуемых факторов.

Чтобы иметь возможность оценивать влияние факторов, не имеющих количественного описания, на отклик и сравнивать влияние различных факторов, используется метод дисперсионного анализа, впервые предложенный Р. Фишером.

**Дисперсионный анализ** — статистический метод качественного решения задачи измерения связи, устанавливающий структуру связи между результативным и факторными признаками.

Решение задачи измерения связи опирается на разложение суммы квадратов отклонений наблюдаемых значений результативного признака  $Y$  от общей средней на отдельные части, обуславливающие изменение  $Y$ .

В соответствии с предполагаемой структурой связи строят план или дисперсионный комплекс наблюдений (экспериментов).

Основным элементарным объектом и понятием плана или комплекса является ячейка (клетка). Получаемые данные изображают в виде комбинационной таблицы, на пересечении строк и столбцов которой помещаются данные, принадлежащие конкретной ячейке комплекса. Такие таблицы служат исходными в дисперсионном анализе и предназначены для получения оценок параметров распределения результативного признака генеральной совокупности в зависимости от факторных значений, а также статистических выводов об отсутствии или наличии влияния факторов на результативный признак.

## 1.2.4. Методы планирования при решении экспериментальных задач второго типа

Главной задачей и конечной целью решения большого числа разнообразных исследовательских проблем управления, проектирования и планирования обычно является достижение и поддержание экстремальных, т. е. наилучших, показателей. Экспериментальные задачи, ставящие своей целью нахождение и поддержание экстремальных, т. е. наилучших по определенному критерию, показателей, относятся к группе задач второго рода.

Основной отличительной чертой методов решения экспериментальных задач первого и второго рода является отсутствие во втором случае необходимости построения математической модели, описывающей процесс или явление. Для этого используются методы последовательной экспериментально-поисковой оптимизации, т. е. в ходе осуществляемых по определенному алгоритму последовательных экспериментов происходит приближение к экстремальным (наилучшим) показателям исследуемого параметра.

Процесс нахождения и поддержания наилучших (в определенном смысле) значений целевой функции объекта называется *оптимизацией*. Критерий оптимизации (целевая функция)  $y$  обычно задается, иногда исследователь выбирает его сам. Этот критерий должен удовлетворять следующим основным условиям:

- 1) нести в себе существенную информацию об объекте, о качестве процесса;
- 2) измеряться с достаточной точностью;
- 3) носить обобщенный характер, т. е. отражать свойства и качества процесса в целом, часто это интегральный показатель качества.

Если математическое ожидание критерия оптимизации  $y$  есть функция от вектора входных управляемых переменных (факторов), т. е.

$$M\{y\} = f(\bar{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2)$$

где  $n$  — число факторов, то задача оптимизации сводится к отысканию таких значений факторов

$$\bar{x}^* = (x_1^*; x_2^*; \dots; x_n^*), \quad (3)$$

при которых целевая функция достигает экстремума.

Если на объект воздействуют аддитивные помехи, то зависимость (2) выражает не функциональную, а регрессионную зависимость, которая в  $(n + 1)$ -мерном пространстве  $n$  факторов  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) и целевой функции  $y$  образует поверхность отклика.

Для решения задачи оптимизации, т. е. для отыскания вектора (3), можно применить два принципиально различных подхода:

- 1) если известна или есть возможность найти  $n$ -факторную математическую модель для той части факторного пространства, где расположен экстремум функции отклика, то задачу оптимизации решают аналитическим или численным методом;

- 2) если математическое описание отсутствует, то осуществляют экспериментальный поиск области оптимума.

В первом случае используют известное из математического анализа свойство функций, имеющих экстремум: в точке экстремума (максимума или минимума) первая производная этой функции обращается в нуль. Если необходимо найти полную производную в  $n$ -факторном пространстве, то находят  $n$  частных производных по каждому из  $n$  факторов и получают систему из  $n$  уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial x_1} = 0, \\ \dots\dots\dots, \\ \frac{\partial y}{\partial x_{n-1}} = 0, \\ \frac{\partial y}{\partial x_n} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Решением системы (4) и является вектор (3). Однако во многих практических случаях аналитическая зависимость (2) неизвестна или ее нахождение представляет собой сложную задачу. Тогда, если имеется возможность одновременно наблюдать все  $n$  факторов и целевую функцию, задачу оптимизации проще решить с помощью второго подхода, т. е. с помощью экспериментального поиска. Для этого сначала изучают характер поверхности отклика в районе первоначально выбранной точки факторного пространства (с помощью специально спланированных «пробных» опытов). Затем совершают «рабочее» движение в сторону экстремума, причем направление движения определяют по результатам пробных опытов. Такое движение может осуществляться посредством ряда этапов, которые могут объединяться в циклы (последовательная процедура).

После выхода в район экстремума оптимальную точку можно уточнить одним из двух способов:

- 1) постановкой дополнительных, особым образом спланированных опытов;
- 2) получением математической модели второго или более высокого порядка и последующим решением системы уравнений (4).

Далее будут рассмотрены несколько методов поисковой оптимизации, которые различаются способами постановки пробных опытов и определения направления движения к экстремуму, а также способами организации самого рабочего движения к экстремуму.

Задача надежного отыскания экстремума усложняется, если на объект воздействуют случайные помехи  $\varepsilon$ . Здесь каждое  $i$ -е измеренное (наблюдавшееся) значение целевой функции  $y_{i \text{ набл}}$  оказывается суммой истинного ее значения  $y_{i \text{ ист}}$  и случайной помехи  $\varepsilon_i$ :

$$y_{i \text{ набл}} = y_{i \text{ ист}} + \varepsilon_i. \quad (5)$$

Для повышения надежности результатов применяют специальные методы. Так, например, в каждой запланированной точке факторного пространства выполняют несколько параллельных опытов. Кроме того, следует учитывать,

что разные поисковые методы в равных условиях обладают различной помехоустойчивостью (способностью правильно оценивать направление рабочего движения, а также быстро и точно приводить рабочую точку в область экстремума несмотря на наличие помех).

Если характеристики объекта изменяются, смещаются во времени (дрейф), то это создает дополнительные трудности, и приходится создавать специальные планы эксперимента.

В условиях ограничений решение задачи поиска оптимума имеет ряд особенностей, которые рассмотрены в конце данного раздела.

При решении задач поиска экстремальных значений функции отклика следует учитывать следующие положения:

1. На точность выхода в область экстремума влияют помехи  $\varepsilon$ , поэтому при приближении к экстремуму в случае статического объекта рекомендуется выполнять параллельные опыты в намеченных точках факторного пространства (пробных и рабочих), что позволит точнее выделить приращения отклика в условиях помех, т. е. повысить точность нахождения экстремума.

2. Эффективность каждого из рассмотренных методов зависит от конкретных условий, в частности от уровня шума, формы поверхности отклика: крутая она или пологая, имеет ли ярко выраженные нарушения плавности (узкие гребни, овраги и т. д.). Искусство инженера-исследователя состоит в том, чтобы подобрать метод поиска, наиболее подходящий для конкретных условий.

3. Если поверхность отклика имеет несколько экстремумов, то ни один из перечисленных методов не дает гарантии в том, что достигнут глобальный, а не локальный экстремум. Для уверенного нахождения глобального (т. е. главного, самого большого экстремума во всей области возможного изменения факторов) рекомендуется применять многократный поиск, причем каждый раз его следует начинать из различных участков факторного пространства. Если имеется возможность получить математическое описание высоких порядков для всей области допустимых значений или локальные математические описания, охватывающие всю эту область, то это может надежно решить вопрос, является ли найденный экстремум в действительности глобальным или лишь локальным.

4. На большинстве реальных объектов имеются факторные и функциональные ограничения, и инженеру-исследователю необходимо, исходя из априорных соображений или имеющейся информации об объекте исследования, точно ограничить факторное и функциональное пространство для дальнейшей оптимизации объекта управления.

Ниже представлены наиболее распространенные методы поиска экстремальных значений функции отклика.

#### **1.2.4.1. Метод Гаусса — Зайделя**

Метод Гаусса — Зайделя предусматривает поочередное нахождение частных экстремумов целевой функции по каждому фактору  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). При этом на каждом  $i$ -м этапе стабилизируют  $(n - 1)$  факторов и варьируют только один  $i$ -й фактор.

### 1.2.4.2. Градиентные методы

Градиентные методы имеют несколько разновидностей, различающихся правилами выбора ступеней варьирования и рабочих шагов на каждом этапе движения к экстремуму. Сущность стратегии всех этих разновидностей заключается в том, что на каждом этапе вокруг очередной базовой точки организуют пробные эксперименты, по результатам которых оценивают новое направление градиента, после чего в этом направлении совершают один рабочий шаг. Вектор-градиент в  $n$ -факторном пространстве определяется соотношением

$$\text{grad } y = \frac{\partial y}{\partial x_1} \overline{x_1^0} + \frac{\partial y}{\partial x_2} \overline{x_2^0} + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} \overline{x_n^0}, \quad (6)$$

где  $\overline{x_i^0}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) — единичные направляющие векторы (орты), расположенные вдоль факторных осей;  $\frac{\partial y}{\partial x_i}$  — частная производная целевой функции по  $i$ -му фактору.

Пробные опыты (по два в точках, расположенных на прямых, параллельных каждой факторной оси и проходящих через базовую точку) производят с целью получить приближенные оценки частных производных.

Модифицированный градиентный метод (метод Кифера — Вольфовица) отличается от обычного градиентного способа тем, что если в обычном способе градиента размеры интервала варьирования при постановки пробных опытов и размер рабочего шага остаются неизменными, то в модифицированном методе размер интервала варьирования и рабочего шага выбирают в зависимости от номера рабочего шага.

### 1.2.4.3. Метод крутого восхождения (метод Бокса — Уилсона)

Метод крутого восхождения является синтезом лучших качеств градиентных методов и метода Гаусса — Зайделя, причем пробные опыты для выяснения направления движения также выполняют по-особому — методом ПФЭ или ДФЭ. От градиентных методов здесь воспринято выполнение рабочего движения вдоль вектора-градиента, определенного в районе исходной (базовой) точки, а от метода Гаусса — Зайделя взят принцип продвижения не на один рабочий шаг (как в методе градиента), а до достижения частного экстремума функции отклика на направлении градиента, без его корректировки на каждом рабочем шаге. Проведение пробных опытов методом ПФЭ или ДФЭ позволяет более точно оценивать направление градиента, чем при традиционном методе градиента.

### 1.2.4.4. Симплексный метод

Симплексный метод позволяет совмещать пробные опыты для определения направления движения с рабочим движением по поверхности отклика к области оптимума.

Основная идея симплексного метода состоит в следующем. Если во всех  $(n + 1)$  вершинах симплекса поставить опыты и измерить отклик, то (при не-

большом уровне шумов) по величине отклика в вершинах можно судить, в каком направлении следует двигаться, чтобы приблизиться к экстремуму.

**Симплексом** называют выпуклую фигуру или тело, образованное  $(n + 1)$  вершинами в пространстве  $n$  факторов, причем эти  $(n + 1)$  вершин не принадлежат одновременно ни одному из подпространств из  $(n - 1)$  факторов.

В пространстве одного фактора симплексом служит отрезок установленного размера, при  $n = 2$  — треугольник, при  $n = 3$  — тетраэдер. При  $n \geq 4$  привычным образом интерпретировать симплекс невозможно.

При применении симплексного метода продвижение к экстремуму совершается путем зеркального отражения вершины симплекса с минимальным значением отклика через противоположащую сторону или грань симплекса.

#### **1.2.4.5. Метод случайного поиска**

Основная идея метода случайного поиска заключается в том, что точку каждого пробного опыта для изучения поверхности отклика в районе базовой (начальной) точки выбирают случайным образом (отсюда и название метода). Несмотря на произвольность выбора пробной точки, алгоритм случайного поиска позволяет последовательно приближаться к экстремальной области. Опыты производят в исходной (начальной) точке и в случайно выбранной пробной точке, измерения отклика в них сравнивают и, если ищется максимум, совершают рабочий шаг в направлении возрастания целевой функции. Новую рабочую точку принимают за новую начальную и снова выбирают пробную точку случайным образом. Обычно длина рабочего шага превышает интервал варьирования между нулевой и пробной точкой.

#### **1.2.5. Планирование поисковых экстремальных экспериментов при ограничениях**

Большинство реальных объектов имеют два типа ограничений: факторные и функциональные. **Факторными** называют ограничения, накладываемые на входные переменные, т. е. ограничения типа

$$\min \{x_i\} \leq x_i \leq \max \{x_i\}, \quad (7)$$

где  $i$  — номер фактора,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

**Функциональными** называют ограничения, накладываемые на целевые функции, характеризующие количественные и качественные стороны работы объекта:

$$\min \{y_p\} \leq y_p \leq \max \{y_p\}, \quad (8)$$

где  $p$  — номер отклика (выходной переменной).

Задача поисковой оптимизации при наличии ограничений формулируется так: с помощью целенаправленного поиска найти координаты экстремума целевой функции внутри области ограничений, определяемой неравенствами (7) и (8).

Если экстремум целевой функции находится за пределами ограниченной области факторного пространства, особенностью поисковой оптимизации при ограничениях является то, что движение к точке оптимума производится вдоль границ допустимой области.

Для решения экстремальной поисковой задачи при ограничениях используется модифицированный метод крутого восхождения.

Сводная характеристика методов приведена в табл. 4.

Таблица 4

**Характеристика методов планирования поисковых экстремальных экспериментов**

Метод планирования	Область применения метода	
	Достоинства	Недостатки
Метод Гаусса — Зайделя	<p>Очевидная простота стратегии и наглядность.</p> <p>Высокая помехозащищенность в смысле выбора направления движения</p>	<p>Путь к главному экстремуму оказывается обычно долгим, особенно при большом числе <math>n</math> факторов.</p> <p>В условиях крупного промышленного производства оказывается трудно заставить <math>(n - 1)</math> фактор на длительное время.</p> <p>Если поверхность отклика имеет сложную форму (узкие гребни, овраги и т. п.), то использование метода может привести к ложному ответу на вопрос о месте расположения экстремума.</p> <p>Метод не дает информации о взаимодействии факторов</p>
Обычный метод градиента	<p>Достаточная простота стратегии. Повышенная по сравнению с методом Гаусса — Зайделя скорость движения к экстремуму (эффективность)</p>	<p>Большая чуткость к помехам в отношении выбора направления рабочего движения.</p> <p>В случаях, когда поверхность отклика имеет сложную форму, метод может не привести к истинному экстремуму.</p> <p>Если поверхность отклика достаточно пологая, то в условиях помех метод мало эффективен в смысле точности выхода к экстремуму.</p> <p>Как и метод Гаусса — Зайделя, не дает информации о взаимодействии факторов (взаимодействия характеризуют степень кривизны поверхности отклика)</p>
Метод Кифера — Вольфовица	<p>Повышенная точность отыскания экстремальной точки, если поверхность отклика достаточно крутая, а экстремум находится от базовой точки не слишком далеко</p>	<p>Низкая эффективность в условиях пологих поверхностей отклика (при очень пологих поверхностях отклика метод вообще не приводит к цели)</p>

Метод планирования	Область применения метода	
	Достоинства	Недостатки
Метод крутого восхождения (метод Бокса — Уилсона)	<p>Высокая помехозащищенность (помехоустойчивость) в смысле точности оценивания составляющих градиента: если в градиентных методах каждая составляющая градиента оценивается лишь по двум точкам факторного пространства, то в методе крутого восхождения используется для этой цели ПФЭ, где каждый коэффициент градиента оценивается по всем <math>N = 2^n</math> точкам факторного пространства.</p> <p>Высокая эффективность в смысле скорости движения к экстремуму. По сравнению с методом Гаусса — Зайделя она выше за счет продвижения по градиенту, а по сравнению с градиентными — за счет исключения пробных опытов на каждом рабочем шаге и за счет мысленных опытов.</p> <p>Пробные опыты, выполняемые методом ПФЭ, позволяют получить информацию об оценках коэффициентов при взаимодействиях факторов, характеризующих кривизну поверхности отклика.</p> <p>ПФЭ с применением параллельных опытов позволяет достаточно просто осуществлять надежную статистическую интерпретацию результатов.</p> <p>Метод наиболее эффективен из всех известных при пологих поверхностях отклика</p>	<p>Большая, чем в предыдущих методах, сложность планирования пробных опытов, требующая одновременного варьирования сразу всех факторов относительно базовой точки.</p> <p>Меньшая оперативность по сравнению с симплексным методом в условиях дрейфующих объектов</p>
Симплексный метод	<p>Достаточно высокая помехоустойчивость в смысле выбора направления движения к экстремуму.</p> <p>Изучение поверхности отклика сочетается с одновременным рабочим движением к экстремуму.</p> <p>При оптимально выбранном размере симплекса обеспечивается высокая скорость выхода к области экстремума.</p> <p>Высокая оперативность позволяет использовать метод для непрерывной оптимизации объектов с дрейфующим экстремумом</p>	<p>Относительно высокая сложность вычисления координат вершин симплекса.</p> <p>Метод не позволяет непосредственно получать математическое описание изучаемого участка поверхности отклика, как, например, в методе Бокса — Уилсона.</p> <p>В условиях пологих поверхностей отклика симплексный метод дает менее точное решение, чем метод крутого восхождения</p>

Метод планирования	Область применения метода	
	Достоинства	Недостатки
Метод случайного поиска	<p>Случайный выбор точки факторного пространства для выполнения пробного опыта не зависит от случайных помех и формы поверхности отклика.</p> <p>Простота поискового алгоритма.</p> <p>Особенно эффективен для оптимизации многофакторных объектов в условиях большого числа ограничений, что важно при проектировании новых объектов.</p> <p>С ростом числа факторов эффективность метода возрастает</p>	<p>В общем случае направление рабочих шагов не является оптимальным.</p> <p>При использовании (без ЭВМ и специальных программ) метод существенно менее эффективен, чем методы крутого восхождения и симплексный.</p> <p>Малая эффективность в условиях пологих поверхностей отклика</p>

### 1.3. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для получения функции искомой зависимости, а также анализа параметров математической модели исследуемого процесса или явления используются следующие методы математической статистики: метод наименьших квадратов (МНК), метод регрессионного и корреляционного анализа.

#### 1.3.1. Предварительный анализ экспериментальных данных

Уравнение связи между тремя и более связанными между собой признаками носит название *множественной (многофакторной) регрессии*. При исследовании таких связей методами множественной регрессии задача формулируется так же, как и при исследовании парной регрессии, т. е. требуется найти аналитическое выражение между результативным признаком  $y$  и факторными признаками  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , т. е. найти функцию

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (9)$$

То обстоятельство, что математика может для любой заданной области значений представить весьма большое количество различных функций, в значительной мере осложняет их выбор. Некоторые предпосылки для выбора определенного уравнения регрессии можно получить на основе анализа предшествующих аналогичных исследований в данной или смежной отраслях знаний.

Наиболее приемлемым способом определения вида исходного уравнения регрессии является метод перебора различных уравнений. Предварительное количественное и качественное описание изучаемого явления позволяет

выделить сравнительно небольшой круг уравнений, проверку адекватности которых исследуемому процессу можно провести достаточно быстро с применением алгоритма перебора на ЭВМ, так как перебор математических уравнений вручную, конечно же, процесс весьма трудоемкий и сложный.

Важным этапом построения уже выбранного уравнения множественной регрессии является отбор и последующее включение факторных признаков.

Наиболее приемлемым способом отбора факторных признаков является **шаговая регрессия** (шаговый регрессионный анализ). Сущность метода шаговой регрессии заключается в последовательном включении факторов в уравнение регрессии и последующей проверки их значимости. Факторы поочередно вводятся в уравнение так называемым прямым методом.

При проверке значимости (полезности) введенного факторного признака определяется, насколько уменьшилась сумма квадратов остатков, которая получается на основании суммирования квадратов разности между фактическими значениями результативного признака и его значениями, полученными в ходе решения уравнения регрессии.

Одновременно используется и обратный метод, т. е. исключение факторов, ставших незначительными. Фактор является незначительным, если его включение в уравнение регрессии только изменяет значение коэффициентов регрессии, не уменьшая суммы квадратов остатков.

Вид уравнения регрессии удобно определять, если значения исследуемых факторов представлены рядами параллельных данных.

При факторном планировании данные выводятся в виде матрицы сочетаний факторных признаков, при 2-, 3-уровневом представлении каждого фактора. Но для определения вида уравнения регрессии можно представить результаты эксперимента в виде следующих рядов параллельных данных (табл. 5).

Таблица 5

**Представление результатов эксперимента в виде рядов параллельных данных**

$X_{1 \min}$	$X_{0,1}$	$X_{1 \max}$
$X_{2 \min}$	$X_{0,2}$	$X_{2 \max}$
$X_{3 \min}$	$X_{0,3}$	$X_{3 \max}$
$y(X_{1 \min}, X_{2 \min}, X_{3 \min})$	$y(X_{0,1}, X_{0,2}, X_{0,3})$	$y(X_{1 \max}, X_{2 \max}, X_{3 \max})$

На основании этих данных можно сделать вывод о том, каким образом изменяется значение результативного признака при увеличении значений факторных признаков. Если результативный и факторный признаки возрастают примерно одинаково, в арифметической прогрессии, то это свидетельствует о том, что связь между ними линейная, если же один признак увеличивается, а другой уменьшается — связь гиперболическая. Если результативный признак увеличивается в арифметической прогрессии, а факторный значительно быстрее, то используется параболическая или другая степенная регрессия (рис. 3).

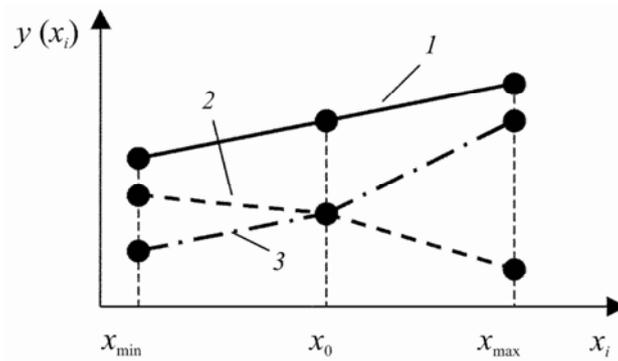


Рис. 3. Определение вида функциональной зависимости переменных:  $x_i$  — уровни варьирования переменных факторов (минимальный, средний, максимальный): 1 — линейная зависимость; 2 — гиперболическая зависимость; 3 — параболическая или другая степенная зависимость

Наиболее распространенными видами исходного уравнения регрессии являются:  $x_0$

- 1) линейное:  $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$ ;
- 2) степенное:  $y = a_0x_1^{a_1}x_2^{a_2}x_3^{a_3}$  или  $y = a_0a_1^{x_1}a_2^{x_2}a_3^{x_3}$ ;
- 3) показательное:  $y = e^{a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_3}$  или  $\ln y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$ ;
- 4) параболическое:  $y = a_0 + a_1x_1^2 + a_2x_2^2 + a_3x_3^2$ ;
- 5) гиперболическое:  $y = a_0 + \frac{a_1}{x_1} + \frac{a_2}{x_2} + \frac{a_3}{x_3}$ .

### 1.3.2. Методы построения математической модели исследуемого процесса или явления

Для определения параметров регрессионных уравнений, отражающих искомую зависимость переменных, наиболее часто используется метод наименьших квадратов. Покажем для примера принципы МНК для получения уравнения линейной регрессии.

Если бы все значения, полученные по данным наблюдений, лежали строго на прямой, описываемой линейным уравнением, то для каждой из точек было бы справедливо следующее равенство:

$$y_i - a_0 - a_1x_1 - a_2x_2 - a_3x_3 = 0. \quad (10)$$

Однако на практике имеет место другое равенство:

$$y_i - a_0 - a_1x_1 - a_2x_2 - a_3x_3 = \Delta_i, \quad (11)$$

т. е. существует разность  $\Delta_i$  между данными наблюдения и данными, полученными по уравнению связи.

МНК предполагает минимизацию суммы квадратных ошибок:

$$S = \sum_{i=1}^N \Delta_i^2 \Rightarrow \min. \quad (12)$$

Минимизируя сумму

$$S = \sum_{i=1}^N \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - a_0 - a_1x_1 - a_2x_2 - a_3x_3)^2 \Rightarrow \min, \quad (13)$$

мы получим четыре уравнения.

Для нахождения значений неизвестных параметров необходимо приравнять частные производные указанной суммы по этим параметрам к нулю:

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = -2\sum(y_i - a_0 - a_1x_1 - a_2x_2 - a_3x_3) = 0; \quad (14)$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = -2\sum(y_i - a_0 - a_1x_1 - a_2x_2 - a_3x_3)x_1 = 0; \quad (15)$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_2} = -2\sum(y_i - a_0 - a_1x_1 - a_2x_2 - a_3x_3)x_2 = 0; \quad (16)$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_3} = -2\sum(y_i - a_0 - a_1x_1 - a_2x_2 - a_3x_3)x_3 = 0. \quad (17)$$

Тогда система нормальных уравнений будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} Na_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 + a_3 \sum x_3 = \sum y, \\ a_0 \sum x_1 + a_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum x_2x_1 + a_3 \sum x_3x_1 = \sum yx_1, \\ a_0 \sum x_2 + a_1 \sum x_1x_2 + a_2 \sum x_2^2 + a_3 \sum x_3x_2 = \sum yx_2, \\ a_0 \sum x_3 + a_1 \sum x_1x_3 + a_2 \sum x_2x_3 + a_3 \sum x_3^2 = \sum yx_3. \end{cases} \quad (18)$$

Решая систему уравнений, мы получим параметры уравнения линейной регрессии.

Таким же образом составляются системы линейных уравнений и для других видов математических уравнений, которые могут быть адекватны исследуемому процессу. Так, для уравнения параболического вида система линейных уравнений примет следующий вид:

$$\begin{cases} Na_0 + a_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum x_2^2 + a_3 \sum x_3^2 = \sum y, \\ a_0 \sum x_1^2 + a_1 \sum x_1^4 + a_2 \sum x_2^2x_1^2 + a_3 \sum x_3^2x_1^2 = \sum yx_1^2, \\ a_0 \sum x_2^2 + a_1 \sum x_1^2x_2^2 + a_2 \sum x_2^4 + a_3 \sum x_3^2x_2^2 = \sum yx_2^2, \\ a_0 \sum x_3^2 + a_1 \sum x_1x_3 + a_2 \sum x_2x_3 + a_3 \sum x_3^2 = \sum yx_3^2. \end{cases} \quad (19)$$

Для нахождения параметров уравнений множественной степенной регрессии с использованием метода наименьших квадратов необходимо исходный вид уравнения привести к линейному, для чего применяется логарифмирование.

После логарифмирования уравнение вида

$$y = a_0 x_1^{a_1} x_2^{a_2} x_3^{a_3} \quad (20)$$

примет следующий вид:

$$\lg y = \lg a_0 + a_1 \lg x_1 + a_2 \lg x_2 + a_3 \lg x_3.$$

После введения новых обозначений

$$\lg y = y^*, \lg a_0 = a_0^*, \lg x_1 = x_1^*, \lg x_2 = x_2^*, \lg x_3 = x_3^*$$

исходное уравнение примет вид

$$y^* = a_0^* + a_1 x_1^* + a_2 x_2^* + a_3 x_3^*. \quad (21)$$

Прологарифмировав уравнение вида

$$y = a_0 a_1^{x_1} a_2^{x_2} a_3^{x_3}, \quad (22)$$

получим уравнение

$$\lg y = \lg a_0 + x_1 \lg a_1 + x_2 \lg a_2 + x_3 \lg a_3.$$

После обозначения

$$\lg y = y^*, \lg a_0 = a_0^*, \lg a_1 = a_1^*, \lg a_2 = a_2^*, \lg a_3 = a_3^*$$

получим уравнение вида

$$y^* = a_0^* + a_1^* x_1 + a_2^* x_2 + a_3^* x_3. \quad (23)$$

После нахождения параметров уравнений (21) или (23) по методу наименьших квадратов они приводятся к исходному виду (20) и, соответственно, (22).

### 1.3.3. Корреляционный анализ экспериментальных данных

**Корреляционный анализ** — метод исследования взаимозависимости признаков в генеральной совокупности, которые являются случайными величинами, имеющими нормальное распределение.

Основными задачами корреляционного анализа являются:

оценка параметров многомерной нормально распределенной генеральной совокупности (генеральных средних, дисперсий и парных коэффициентов корреляции), множественных и частных коэффициентов корреляции;

проверка значимости оцениваемых параметров взаимосвязи;

получение интервальных оценок для значимых из них;

выявление структуры взаимозависимости признаков.

Дополнительной задачей может стать построение различных уравнений регрессии и статистические выводы относительно полученных уравнений и коэффициентов регрессии (корреляционно-регрессионный анализ).

### 1.3.3.1. Нахождение уравнения линейной корреляционной связи

Рассмотрим пример нахождения коэффициентов для уравнения линейной множественной регрессии вида

$$x_1 = a_1 + a_2x_2 + \dots + a_px_p. \quad (24)$$

Коэффициенты уравнения корреляционной связи находится по следующему алгоритму:

1. Для всех  $x_i$  вычисляются средние значения и средние квадратические отклонения (дисперсии) по формулам

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_{j,i}}{n}; \quad (25)$$

$$\sigma_{x_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_{ji}^2}{n} - (\bar{x}_j)^2}, \quad (26)$$

где  $n$  — число значений  $x_j$ .

2. Вычисляются коэффициенты корреляции между  $x_j$  и  $x_k$  по формуле ( $j; k = 1, 2, 3, \dots, p$ ):

$$r_{x_j;x_k} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_{j,i} x_{k,i} - \sum_{i=1}^n x_{j,i} \sum_{i=1}^n x_{k,i}}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n x_{j,i}^2 - (\sum_{i=1}^n x_{j,i})^2][n \sum_{i=1}^n x_{k,i}^2 - (\sum_{i=1}^n x_{k,i})^2]}}. \quad (27)$$

Следует иметь в виду, что

$$r_{x_j, x_k} = r_{x_k, x_j} \text{ и } r_{x_j, x_j} = r_{x_k, x_k} = 1.$$

3. По вычисленным коэффициентам  $r_{x_j, x_k}$  составляется система линейных уравнений:

$$\begin{cases} r_{x_1, x_2} = \beta_2 + \beta_3 r_{x_3, x_2} + \dots + \beta_p r_{x_p, x_2} \\ r_{x_1, x_3} = \beta_2 r_{x_2, x_3} + \beta_3 + \beta_4 r_{x_4, x_3} + \dots + \beta_p r_{x_p, x_3} \\ r_{x_1, x_4} = \beta_2 r_{x_2, x_4} + \beta_3 r_{x_3, x_4} + \beta_4 + \dots + \beta_p r_{x_p, x_4}, \\ \dots \\ r_{x_1, x_p} = \beta_2 r_{x_2, x_p} + \beta_3 r_{x_3, x_p} + \beta_4 r_{x_4, x_p} + \dots + \beta_p \end{cases} \quad (28)$$

где  $\beta_2, \beta_3, \dots, \beta_p$  — коэффициенты, определяемые по данной системе уравнений.

4. Определяются коэффициенты уравнения регрессии по формулам

$$a_2 = \beta_2 \frac{\sigma_{x_1}}{\sigma_{x_2}}; a_3 = \beta_3 \frac{\sigma_{x_1}}{\sigma_{x_3}}; \dots; a_p = \beta_p \frac{\sigma_{x_1}}{\sigma_{x_p}}; \quad (29)$$
$$a_1 = \bar{x}_1 - a_2 \bar{x}_2 - a_3 \bar{x}_3 - \dots - a_p \bar{x}_p.$$

5. После подстановки полученных коэффициентов в уравнение (24) определяются теоретические значения зависимых переменных.

6. Находят среднюю ошибку приближения и осуществляют оценку адекватности модели, значимости коэффициентов регрессии в соответствии с методикой, изложенной в п. 3.4.

### **1.3.3.2. Установление тесноты линейной корреляционной связи между переменными**

Для описания степени связи между рассматриваемыми переменными чаще всего пользуются коэффициентом корреляции, который указывает на тесноту связи между двумя случайными величинами и позволяет судить о степени линейной связи между ними.

Степень линейной связи между результативным признаком и совокупностью переменных факторов оценивается посредством совокупного коэффициента корреляции. Он определяется по формуле (для 2-факторного эксперимента):

$$R = \sqrt{\frac{r_{x_1y}^2 + r_{x_2y}^2 - 2r_{x_1y}r_{x_2y}r_{x_1x_2}}{1 - r_{x_1x_2}^2}}. \quad (30)$$

Совокупный коэффициент корреляции имеет следующие свойства:

- 1) изменяется от 0 до 1;
- 2) если  $R = 0$ , то  $y$  не может быть связан с факторными признаками линейной корреляционной зависимостью, однако при этом возможна нелинейная и даже функциональная связь;
- 3) если  $R = 1$ , то между результативным и факторными признаками существует линейная функциональная зависимость;
- 4) если коэффициент корреляции отличен от крайних значений, то теснота связи определяется степенью приближения к единице.

В случае если необходимо установить тесноту связи отдельно между парами переменных, то для этого рассчитываются частные коэффициенты корреляции. Частный коэффициент корреляции между двумя случайными величинами определяется по формуле (27). Его свойства аналогичны свойствам совокупного коэффициента корреляции.

## 1.3.4. Регрессионный анализ экспериментальных данных

### 1.3.4.1. Оценка адекватности регрессионной модели

После получения параметров уравнения производится проверка адекватности полученных регрессионных зависимостей.

Сравнение различных уравнений регрессии начинается с определения  $F$ -критерия (критерия Фишера), который характеризует адекватность модели исследуемому процессу:

$$F = \frac{\sigma_{\text{на}}^2}{\sigma_3^2}, \quad (31)$$

где  $\sigma_{\text{на}}^2$  — оценка дисперсии неадекватности:

$$\sigma_{\text{на}}^2 = \frac{1}{N-B} \sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2, \quad (32)$$

где  $N$  — число опытов факторного эксперимента (опыты основного уровня не учитываются);  $B$  — число значимых коэффициентов регрессионной модели;  $y_j$  и  $\hat{y}_j$  — экспериментальное и расчетное значение результативного признака в  $j$ -й точке плана;  $\sigma_3^2$  — дисперсия воспроизводимости эксперимента:

$$\sigma_3^2 = \frac{1}{rN} \sum_{j=1}^N \sigma_j^2, \quad (33)$$

где  $\sigma_j^2$  — оценка дисперсии в  $i$ -й серии параллельных опытов:

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^r (y_{j,i} - \bar{y}_j)^2, \quad (34)$$

где  $r$  — количество параллельных опытов в  $j$ -й точке плана;  $y_{i,j}$  — значения результативного признака в серии параллельных опытов в  $j$ -й точке плана;  $\bar{y}_j$  — среднее арифметическое значений параллельных опытов в  $j$ -й точке плана.

В данной работе рекомендуется проводить одну серию параллельных опытов для точки плана, где факторные признаки установлены на основном уровне исследования, т. е. при вычислении дисперсии воспроизводимости эксперимента  $n = 1$  и  $r = 3$ .

Расчетные значения  $F$  сравнивают с табличными  $F_{\text{табл}}$ . Если при  $\alpha = 0,05$   $F_p < F_{\text{табл}}$ , то модель является адекватной.

Значения  $F_{\text{табл}}$  представлены в прил. 4, табл. П.4.1 при числе степеней свободы числителя  $f_1 = f_{\text{на}} = N - B$  ( $N$  — количество опытов без опытов основного уровня;  $B$  — число значимых коэффициентов регрессионной моде-

ли), а знаменателя  $f_2 = f_3 = n(r - 1)$  ( $n$  — количество серий параллельных опытов, проведенных для расчета дисперсии воспроизводимости;  $r$  — число параллельных опытов в  $j$ -й серии, т. е.  $n = 1, r = 3$ ).

Далее, чтобы окончательно удостовериться в адекватности модели, рассчитываем среднюю ошибку аппроксимации:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum \frac{y_j - \hat{y}_j}{y_j} 100 \%. \quad (35)$$

Средняя ошибка аппроксимации показывает в процентах среднее для всех значений результативного признака отклонение расчетных значений. Модель можно считать адекватной, если ошибка аппроксимации будет находиться в пределах 12...15 %.

#### **1.3.4.2. Оценка значимости коэффициентов регрессии**

Значимость коэффициентов регрессии проверяется с помощью  $t$ -критерия:

$$t = a_i \sqrt{\frac{(n-2)(x_i - \bar{x})^2}{(y_i - \tilde{y}_i)^2}}. \quad (36)$$

Значения критерия Стьюдента представлены в прил. 4, табл. П.4.2. Значение критерия Стьюдента принимаем при числе степеней свободы  $f = N - 2$  ( $N$  — количество опытов без параллельных опытов основного уровня).

## **2. ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕТОНОВ И РАСТВОРОВ, ПРИГОТОВЛЕННЫХ НА СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУХИХ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНЫХ СМЕСЕЙ**

### **2.1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУХИХ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНЫХ СМЕСЕЙ В СТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

В нашей стране современный опыт применения сухих смесей распространяется на строительные растворы, предназначенные для каменной кладки, штукатурных работ, приготовления материалов для отделочных работ (побелка, клеи и прочие). Технология использования сухих смесей на отечественных строительных площадках предусматривает их хранение «навалом» (например, для штукатурной массы) или в мешках (цементно-песчаная смесь для каменной кладки и штукатурных работ).

Приготовление строительных растворов осуществляется в смесителях принудительного или гравитационного действия. Подача к месту использования производится при помощи бункеров или растворобетононасосов. Маленький промежуток времени между приготовлением и использованием строительных растворов позволяет успешно применять как жесткие, так и литые смеси с минимальным водоцементным отношением. При этом достигается экономия вяжущего, а также улучшается удобоукладываемость смеси, что повышает производительность труда рабочих.

Современный опыт использования сухих смесей предполагает наиболее широкое их применение в гражданском строительстве. Для того чтобы оценить значимость исследуемого вопроса, весьма целесообразно рассмотреть перспективы развития строительства для социальных нужд.

Развитие технологических процессов возведения зданий и сооружений из монолитного бетона и железобетона, приготовленного на строительной площадке с использованием сухих смесей, предполагается в условиях значительного возрастания объемов малоэтажного жилищного строительства.

При индивидуальной застройке могут применяться различные конструктивные решения зданий: крупнопанельные, крупноблочные, объемно-блочные, здания монолитной и сборно-монолитной конструкции, из мелких блоков, кирпичные и деревянные. Из 280 млн м<sup>2</sup> жилья, намеченных к строительству в сельской местности, объемы по конструктивам распределяются следующим образом:

- здания кирпичные и из мелких блоков — 43...48 %;
- деревянные — 34 %;
- монолитные и сборно-монолитные — 14...26 %;
- из сборного железобетона — 9...26 %.

Существующий опыт строительства малоэтажных домов из монолитного бетона и железобетона предполагает использование легкого конструктивно-теплоизоляционного керамзитобетона. В качестве заполнителей в таких бетонах используются керамзит, керамзитовый песок и другие материалы. Однако прогресс в области строительных материалов для монолитного домостроения определил более прогрессивный состав конструктивно-теплоизоляционного бетона. В этот состав включается газообразователь (воздухововлекающая добавка), который позволяет уменьшать объемный вес изделий без потери прочности возводимых конструкций. Кроме этого, крупность заполнителей используемых для приготовления ячеистых бетонов отвечает самым строгим требованиям, предъявляемым к производству сухих смесей.

Значительный рост объемов жилищного строительства, наметившийся в связи с изменением инвестиционной политики государства, требует поиска таких технологий и материалов, которые позволят без значительных капитальных затрат увеличивать объемы строительства. Одним из таких направлений, на наш взгляд, является строительство из монолитного бетона и железобетона с использованием сухой цементно-песчаной составляющей.

Вопросы приготовления бетонной смеси неразрывно связаны с видом бетонной смеси, используемой для возведения конструкций из монолитного бетона и железобетона. В настоящее время принято разделять бетонные смеси на специальные, тяжелые, легкие (теплоизоляционные и конструктивно-теплоизоляционные). В этой связи при рассмотрении технологии приготовления бетонной смеси рассматривались особенности с учетом приведенной выше классификации.

Кроме объемного веса и рецептурного состава на технико-экономические показатели приготовления бетонных весьма существенно влияет тип смесителя. Отечественной и зарубежной промышленностью освоен выпуск гравитационных смесителей, а также смесителей принудительного действия. Эта особенность также включена в число факторов, определяющих технико-экономические показатели приготовления строительных растворов.

В соответствии с особенностями технологии приготовления строительных растворов на строительной площадке с использованием сухих смесей при помощи мобильных бетоносмесительных установок, а также в отдельных смесителях определены следующие строительные растворы:

1. Обычные бетоны (тяжелые и легкие). В качестве заполнителя в них могут быть использованы щебень, гравий или керамзит. Отличительной особенностью приготовления обычных бетонов является использование сухой (влажность 0,3 %) цементно-песчаной смеси. Цементно-песчаная смесь при этом может доставляться на строительную площадку в мешках и силосах. Крупный заполнитель добавляется в смесь на строительной площадке, и его дозирование рекомендуется осуществлять по объему.

2. Растворы. Они не содержат крупную фракцию и предназначены для наружной и внутренней отделки (ремонта и восстановления) зданий и сооружений. Сухая смесь, предназначенная для приготовления растворов, может быть упакована в мешки или бункера силосного типа. Для загрузки смесителя используется шнековая или пневматическая подача сухой смеси.

3. Ячеистые бетоны. Они используются для возведения монолитных конструкций, производства мелкоштучных стеновых материалов (блоков). Теплоизоляционный и конструктивно-теплоизоляционный бетон получается благодаря введению в его растворную часть воздухововлекающих (порообразующих) добавок. Введение этих добавок рекомендуется осуществлять в жидком виде, поэтому при поставке сухой ячеисто-бетонной смеси в мешках необходима отдельная дозировка и упаковка добавки. При этом добавка может быть отдозирована и упакована как в жидком, так и в сухом виде. В ячеисто-бетонной смеси отсутствует крупная фракция заполнителя, и ограничений при упаковке, транспортировке и использовании нет.

4. Мелкозернистый бетон. К производству сухой смеси для приготовления мелкозернистого бетона предъявляются такие же требования, как и к производству сухих смесей. Мелкозернистый бетон имеет наиболее широкий спектр применения.

Таким образом, перечисленные строительные растворы охватывают весь спектр строительного-монтажных работ, выполняемых при возведении, ремонте и реконструкции зданий и сооружений.

## **2.2. ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИГОТОВЛЕНИЯ БЕТОНОВ И РАСТВОРОВ НА СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУХОЙ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ СМЕСИ**

Технологический процесс приготовления бетонной смеси на строительной площадке предусматривает наличие складов заполнителя, системы дозаторов, а также смесительных установок. В зависимости от технологического оборудования различают приготовление бетонов и растворов в мобильных бетоносмесительных установках и в отдельных смесителях.

К числу мобильных бетоносмесительных установок обычно причисляют комплект отечественного или импортного оборудования (табл. 6), включающий склад (в большинстве случаев секторного типа) для хранения вяжущих материалов (один или три бункера силосного типа) и бетоносмесительное оборудование, оснащенное весовыми дозаторами.

Таблица 6

### Основные технические характеристики бетоносмесительных установок

Показатель	Бетоносмесительная установка			
	СБ-140	СБ-134	СБ-135	СБ-145
Производительность, м <sup>3</sup> /ч.	12	20	30	30
Объем смесителя, л:				
по загрузке	375	750	1500	1500
по выходу	250	500	1000	1000
Тип смесителей	Принудительный	Гравитационный	Принудительный	Принудительный
Мощность, кВт	31,85	36	85	90
Масса, т	14,3	17,5	23	75
Габариты, мм:				
длина	12500	19600	24 000	25 000
ширина	9400	3650	3650	9500
высота	6000	10 500	12 740	13 000

Технологический процесс приготовления строительных смесей в мобильных бетоносмесительных установках состоит из следующих операций:

1. Прием компонентов строительных смесей на склад. На отечественных мобильных бетоносмесительных установках доставка компонентов осуществляется автомобильным транспортом. Заполнение секторного склада выполняется при помощи бульдозера или погрузчика. Основные требования по организации складского хозяйства и технико-экономические показатели работы складов крупного и мелкого заполнителя представлены в табл. 7 и 8.

Таблица 7

### Технико-экономические показатели работы складов крупного заполнителя

Показатель	Бетоносмесительная установка			
	СБ-140	СБ-134	СБ-135	СБ-145
Объем секторного склада заполнителя, м <sup>3</sup> , при работе:				
в одну смену	159	293	387	387
две смены	302	557	735	735
три смены	429	527	1045	1045
Количество средств механизации, используемых при заполнении складов заполнителя, шт.:				
погрузчики	1	1	2	2
бульдозеры	1	2	3	3
Стоимость работ по заполнению склада, на 1 м <sup>3</sup> (в ценах 1996 г.), р., при работе:				
погрузчика	28125	16981	22500	22500
бульдозера	21875	26415	26250	26250
Затраты труда, необходимые для закладки 100 м <sup>3</sup> заполнителя на склад, чел.-ч: при работе:				
погрузчика	25,031	15,094	20,035	20,035
бульдозера	25,031	30,188	30,016	30,016

Загрузка силосных складов, используемых для хранения вяжущих материалов или сухой строительной смеси, осуществляется при помощи пневмотранспорта, которым оснащаются специализированные автотранспортные средства (например, цементовозы).

Таблица 8

**Технико-экономические показатели работы складов для сухой смеси**

Показатель	Бетоносмесительная установка			
	СБ-140	СБ-134	СБ-135	СБ-145
Объем силосного склада цементно-песчаной смеси, м <sup>3</sup> , при работе:				
в одну смену	19	32	48	48
две смены	36	57	91	91
три смены	51	83	179	179
Количество бункеров силосного типа ( $v = 20 \text{ м}^3$ ), используемых для хранения сухой смеси, шт., при работе:				
в одну смену	1	2	3	3
две смены	2	3	5	5
три смены	3	4	9	9
Стоимость работ по заполнению 1 м <sup>3</sup> склада (в ценах 1996 г.), р.*	2556	2011	1875	1875
Затраты труда, необходимые для заполнения 1 м <sup>3</sup> сухой смеси силоса, чел.-ч	0,83	0,5	0,33	0,33

\* Требуется использование повышающего коэффициента

2. Транспортировка компонентов строительных растворов внутри мобильной бетоносмесительной установки. Доставка крупного и мелкого заполнителя со склада в расходный бункер выполняется при помощи скипового подъемника. Дальнейшая транспортировка обеспечивается системой лотков, движение материала по которым осуществляется за счет его собственного веса.

Подача вяжущего из склада бункерного типа выполняется при помощи шнеков или пневмотранспортом.

Все указанные методы транспортировки имеют высокую степень автоматизации и не требуют затрат ручного труда. Кроме того, производительность транспортных коммуникаций во много раз превышает техническую производительность бетоносмесительной установки.

3. Дозирование заполнителей и вяжущего. При приготовлении бетонных смесей и растворов дозирование компонентов выполняется по весу.

Исключением является керамзит, для которого устанавливается объемная дозировка. Погрешность при дозировании не должна превышать 2 % (табл. 9).

4. Перемешивание компонентов строительных смесей, которое происходит в смесителях гравитационного или принудительного действия. Продолжительность перемешивания устанавливается экспериментально и зависит от вида крупного заполнителя и водоцементного отношения смеси. Вместе с тем по данным ЦНИИОМТП Н. Г. Новицкого, установлена минимальная продолжительность перемешивания бетонных смесей (табл. 10).

Таблица 9

## Технические характеристики дозаторов

Материал	Марка дозатора	Масса цикла, кг	Объем цикла, м <sup>3</sup>	Время цикла, с.	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Масса, кг
Сухая смесь	АД-400-ДБЦ, ДБЦ-400	80...400	0,75	45	3920	3070	3070	1575
	АД-600-2БЦ, ДБЦ-600	200...600	0,98	45	3920	3270	3270	1600
Заполнитель	АД-500-БП, ДБП-500	100...500	0,58	30	1710	2815	2815	500
	АД-800-БП, ДБП-800	200...800	0,78	30	1710	2895	2895	555
	АД-500-2БП, 2БП	100...500	0,81	30	2150	2515	2515	640
	АД-1600-2БП, 2ДБП-1600	400...1600	1,27	45	2150	2945	2945	770

Таблица 10

## Технико-экономические показатели перемешивания бетонных смесей

Показатель	Бетоносмесительная установка			
	СБ-140	СБ-134	СБ-135	СБ-145
Производительность, м <sup>3</sup> /ч	12	20	30	30
Объем смесителя, л:				
по загрузке	375	750	1500	1500
выходу	250	500	1000	1000
Минимальная продолжительность перемешивания, с	50	70	90	90
Продолжительность технологического цикла, с	75	90	120	120
Количество смесителей	1	1	1	1
Количество операторов (рабочих на смесительном и дозаторном участках), чел.	1	1	2	2
Затраты труда, необходимые для приготовления 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, чел.-ч	0,083	0,05	0,06	0,06
Стоимость приготовления 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, р.	3030	1395	1175	1200

5. Выгрузка готовой строительной смеси из смесителя производится опрокидыванием смесителя или при помощи открытия выгрузочного отверстия. Выгружаемая смесь попадает в приемный бункер внутриплощадочного транспорта. В качестве внутриплощадочного транспорта, предназначенного для растворов и бетонных смесей, используются:

поворотные и неповоротные бункера и металлические ящики, перемещаемые краном;

автосамосвалы, автобетоновозы и автобетоносмесители; специализированные бетоноукладочные машины (конвейеры-бетоноукладчики, автобетононасосы);

передвижные расходные бункера при организации производства бетонных камней или сборных железобетонных конструкций на строительной площадке.

К недостаткам использования мобильных бетоносмесительных установок в построечных условиях можно отнести отсутствие оборудования для сушки и фракционирования заполнителя. В результате весьма проблематично приготовление строительных растворов при низкой положительной (ниже 5 °С) и отрицательной температуре. Также использование открытых складов для хранения заполнителей затрудняет точную дозировку воды в результате прямого попадания влаги на крупный и мелкий заполнители.

Отечественной промышленностью освоен выпуск отдельных смесителей принудительного и гравитационного действия, предназначенных для приготовления строительных смесей в построечных условиях, объемом 50, 100, 200, 250, 500 и 1000 л (табл. 11).

Таблица 11

**Основные технические характеристики смесителей**

Установка	Объем по загрузке, л	Число циклов в ч, шт.	Мощность, кВт/ч	Габаритные размеры, м	Масса, кг
<i>Принудительного действия</i>					
СБ-141	375	48	15	2,5 × 2,0 × 2,2	1970
СБ-146А	750	45	22	2,5 × 2,3 × 1,7	2750
СБ-138А	1500	45	37	3,5 × 2,6 × 1,6	4700
СБ-112	1000	36	40	3,0 × 2,7 × 2,8	5200
СБ-43Б	65		3	1,7 × 1,9 × 0,5	1600
СБ-100	500	28	55	2,9 × 1,9 × 1,7	2400
СБ-81	800	30	40	2,5 × 1,0 × 1,8	2150
СБ-120	1000	30	55	3,2 × 1,9 × 1,8	2600
<i>Гравитационного действия</i>					
СБ-174	100	18	0,55	1,38 × 1,1 × 1,4	150
СБ-30Г	250	20	3,7	1,9 × 1,7 × 2,26	700
СБ-16Г	750	14	5,5	2,55 × 2,0 × 2,85	1600
СБ-91Б	750	14	4	1,85 × 2,0 × 1,8	970
СБ-153А	1500	20	15	2,6 × 2,5 × 2,3	2700

Некоторые конструкции отдельных смесителей предусматривают механическую загрузку. Для этого используется ковш, объем которого равен одному замесу. Ковш загружают на земле, а смеситель в этом случае устанавливают на некоторой высоте, как правило, позволяющей загружать автотранспортные средства бетонными смесями и растворами.

Использование сухих смесей для приготовления строительных смесей позволяет значительно улучшить физико-механические и технологические свойства бетонных смесей и растворов, повысить культуру производства, сократить долю тяжелого ручного труда.

Технологический процесс приготовления бетонных смесей и растворов в отдельных смесителях на строительной площадке состоит из следующих технологических операций:

1. Прием и хранение компонентов строительных смесей в построечных условиях. Доставка крупного и мелкого заполнителя бетонных смесей и растворов на строительную площадку автотранспортом.

Эти компоненты, как правило, хранятся в открытых складах и не защищены от атмосферных воздействий, поэтому при приготовлении строительных смесей важно учитывать температуру и влажность крупного заполнителя.

Доставка и хранение вяжущего и добавок осуществляется в закрытых складах (силосах) или емкостях. Для этого на строительной площадке должны быть выполнены работы по устройству соответствующих сооружений.

Использование сухих смесей облегчает решение вопросов, связанных с хранением компонентов строительных смесей.

Использование сухой смеси в мешках предусматривает устройство закрытого склада на строительной площадке.

Использование бункеров-силосов требует устройства площадки в непосредственной близости от смесителя для установки этих емкостей. При этом может осуществляться доставка и замена самих бункеров-силосов либо стационарно установленные силосы могут наполняться с помощью цементовозов, загруженных сухой смесью на заводе.

2. Дозирование заполнителей и вяжущего. Дозирование крупного заполнителя в построечных условиях в большинстве случаев выполняется весьма приблизительно. Для обеспечения заданных физико-механических свойств конструкций вынужденной мерой является перерасход вяжущего, который обеспечивает заданную прочность конструкций. Однако использование сухой цементно-песчаной смеси позволяет избежать этого недостатка. Дозирование крупного заполнителя допускается по объему.

Дозирование сухой смеси осуществляется шнековыми дозаторами, установленными на оборудовании, обеспечивающем подачу сухой смеси в смеситель (шнек или пневмотрубопровод).

При использовании сухой цементно-песчаной смеси в мешках объем замеса должен быть кратен объему сухой смеси в одном или целом количестве мешков.

Дозирование воды осуществляется при помощи водомера, установленного на подающей трубе.

3. Перемешивание строительных смесей. Продолжительность перемешивания устанавливается экспериментально и контролируется строительной лабораторией по осадке конуса или по стандартному определению однородности готовой смеси. Минимальная продолжительность перемешивания бетонной смеси см. табл. 5.

Выгрузка готовой бетонной смеси или раствора осуществляется в расходный металлический ящик или лоток для транспортирования смеси в приемный бункер бетоноукладочной машины.

Технико-экономические показатели использования отдельных смесителей приводятся в табл. 12.

**Техническо-экономические показатели приготовления бетонных смесей  
с использованием сухой цементно-песчаной смеси в построчных условиях  
в отдельных смесителях**

Смеси- тель	Объем по загрузке, л	Производи- тельность, м <sup>3</sup> /ч	Затраты труда на 1м <sup>3</sup> готовой смеси				Стоимость приготовле- ния 1 м <sup>3</sup> смеси, р.*
			В мешках		В силосах		
			Ручная загрузка	Механизиро- ванная загрузка	Ручная загрузка	Механизированная загрузка	
СБ-141	375	12,00	0,17	0,12	0,08	0,06	1970
СБ-146А	750	22,00	0,09	0,075	0,05	0,04	2750
СБ-138А	1500	45,00	0,089	0,66	0,044	0,032	4700
СБ-112	1000	24,00	0,083	0,063	0,042	0,03	5200
СБ-43Б	65	2,00	1,0	0,75	0,50	0,04	1600
СБ-100	500	16,00	0,125	0,093	0,062	0,048	2400
СБ-81	800	20,00	0,1	0,075	0,05	0,04	2150
СБ-120	1000	20,00	0,1	0,075	0,05	0,04	2600
СБ-174	100	4,50	0,22	0,15	0,1	0,08	150
СБ-30Г	250	6,00	0,16	0,12	0,08	0,06	700
СБ-16Г	750	18,00	0,112	0,084	0,056	0,042	1600
СБ-91Б	750	17,00	0,117	0,087	0,058	0,044	970
СБ-153А	1500	30,00	0,067	0,049	0,033	0,024	2700

\* Требуется использование повышающего коэффициента

При разработке проектов производства работ, как правило, ставится задача применения таких организационно-технологических решений, при помощи которых возможно сокращение продолжительности и себестоимости возведения сооружений. Для этого необходимо использовать многовариантное технологическое проектирование.

Сравнение альтернативных решений возведения зданий и сооружений позволяет находить пути увеличения эффективности строительного производства.

## **3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА**

### **3.1. ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Целью проведения лабораторных работ является изучение теоретических основ и практических методов экспериментальных исследований, углубленное изучение свойств бетонов и сухих строительных смесей, а также технологии их использования в строительном производстве.

Для практического освоения научных основ экспериментальных исследований и закрепления знаний, полученных в ходе обучения по дисциплине «Современные технологии строительства из монолитного бетона и железобетона», предлагается выполнить исследования по следующим направлениям:

1. Экспериментальные исследования по изучению свойств минерального вяжущего (цемента):

определение технологических режимов обработки минерального вяжущего (цемента) в лабораторной мельнице (ЛИВ-1), направленное на повышение его активности;

определение зависимости активности минерального вяжущего (цемента) от его модуля удельной поверхности.

2. Экспериментальные исследования по изучению свойств сухих строительных смесей, т. е. экспериментальное определение зависимости физико-механических свойств бетонов и растворов от условий и продолжительности хранения сухой цементно-песчаной смеси.

3. Экспериментальные исследования по изучению технологии приготовления бетонов и растворов с использованием сухой цементно-песчаной смеси:

подбор состава смеси для приготовления строительных растворов;

экспериментальное исследование технологии использования сухой цементно-песчаной смеси для приготовления тяжелых и легких бетонов на строительной площадке.

К работе следует приступать после изучения рекомендуемой нормативной и технической литературы [3—15].

Работа выполняется с использованием методов математического планирования эксперимента. Обработка результатов эксперимента осуществляется методами математической статистики и теории вероятности.

#### **Состав отчета о выполнении лабораторной работы:**

1. Описание объекта исследования и постановка экспериментальной задачи.

1.1. Краткая характеристика объекта исследования.

1.2. Цель выполнения работы.

1.3. Задачи, решаемые в ходе выполнения работы.

1.4. Выбор и краткое описание методов исследования.

2. Планирование эксперимента.

2.1. Формирование основных параметров эксперимента.

2.2. Составление плана проведения эксперимента.

3. Проведение эксперимента.

4. Обработка экспериментальных данных методами математической статистики.

4.1. Получение математической модели исследуемого объекта.

4.2. Поиск экстремальных значений целевой функции.

5. Основные выводы и предложения по результатам проведения исследований.

6. Статья для публикации в Вестнике ВолгГАСУ.

7. Список использованной литературы.

Краткая характеристика состава отчета о выполнении лабораторной работы:

1. Описание объекта исследования и постановка экспериментальной задачи. В данном разделе выполняется обзор научного опыта в рассматриваемой сфере; выявляются актуальные направления экспериментальных исследований; осуществляется выделение объекта и предмета исследования; формулируется гипотеза, которую предполагается обосновать в ходе проведения исследований; определяется цель и задачи исследования; осуществляется выбор и дается краткая характеристика принципов, методов и средств исследования.

2. Планирование эксперимента. В данной части приводятся основные принципы и методы планирования экспериментальных исследований, обосновывается выбранный метод планирования эксперимента и в соответствии с ним осуществляется формирование плана проведения эксперимента.

3. Проведение эксперимента. В соответствии с планом проведения эксперимента и представленными в настоящем пособии методическими рекомендациями по выполнению лабораторных работ выполняется экспериментальная часть исследования с заполнением всех рекомендуемых отчетных табличных форм (прил. 2).

4. Обработка результатов эксперимента. В данной части обосновывается выбор метода обработки экспериментальных данных; осуществляется мате-

матическая обработка экспериментальных данных с получением модели исследуемого процесса; осуществляется анализ модели, нахождение экстремума функций и т. д.

5. Выводы и предложения по результатам проведенных исследований. В соответствии с поставленной целью исследований и рабочей гипотезой, сформулированной до начала проведения экспериментальной части исследований, необходимо представить:

вывод об обоснованности (необоснованности) сформулированной рабочей гипотезы исследования;

выводы о значимости факторных переменных, влиянии факторных переменных, отнесенных к «шумовому полю», об адекватности полученных моделей изучаемому процессу и явлению;

предложения по продолжению исследований в данной области, развитию методов и средств экспериментального исследования.

6. Подготовка статьи для публикации в Вестнике ВолгГАСУ. По результатам проведенных экспериментальных исследований осуществляется подготовка научной статьи для публикации. В статье формируется цель исследования, содержится краткая характеристика использованных методов и средств, приводится характеристика основных результатов проведенных исследований с выводами и предложениями, направленными на развитие данного исследования или внедрения полученных результатов.

7. Список использованной литературы строится по алфавиту фамилий авторов или заглавий. Каждый указанный источник должен иметь полное библиографическое описание.

**Оформление отчета о выполнении лабораторной работы.** Отчет о выполнении лабораторной работы представляет собой пояснительную записку, выполненную на листах стандартного размера (210 × 297 мм), в печатном виде. Параметры и формат компьютерного набора следующие:

формат А4;

поля: верхнее и нижнее поле — 2 см, левое поле — 3 см, правое поле — 1,5 см;

гарнитура шрифта Times New Roman;

размер шрифта 14;

междустрочный интервал полуторный.

Пояснительная записка должна содержать титульный лист, оформленный согласно прил. 1. Основной части отчета должно предшествовать оглавление, где указываются разделы и подразделы работы и соответствующие им номера страниц. Все листы записки (за исключением титульного) должны быть пронумерованы, а номер страницы проставляется в правом верхнем углу листа. Графики и таблицы выполняются на отдельных листах и должны располагаться в соответствующих разделах.

Используемые в работе источники оформляются отдельно в конце записки в разделе «Список использованной литературы».

## 3.2. СТАНДАРТНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОБРАЗЦОВ

### 3.2.1. Определение истинной плотности песка

Истинную плотность песка определяют в пикнометре емкостью 100 мл с риской на шейке (рис. 4) [13].

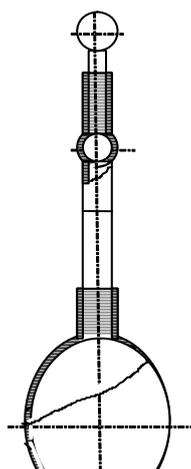


Рис. 4. Пикнометр

От средней пробы песка берут навеску 30...40 г и просеивают через сито с круглыми отверстиями диаметром 5 мм. Прошедший через сито песок переносят в бюкс или фарфоровую чашку и высушивают в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ . Затем бюкс с песком охлаждают до комнатной температуры в эксикаторе консервированной серной кислотой или над безводным хлористым кальцием. Из высушенного песка отвешивают две навески по 10 г каждая, всыпают их в два чистых высушенных и предварительно взвешенных пикнометра, после чего каждый пикнометр с песком взвешивают. Затем оба пикнометра с навесками заливают на  $2/3$  их объема дистиллированной водой, перемешивают содержимое и ставят каждый пикнометр в наклонном положении на песчаную или водяную баню. Содержимое пикнометра кипятят в течении 15...20 мин для удаления пузырьков воздуха. После этого пикнометр обтирают, охлаждают до температуры помещения, доливают до отметки дистиллированную воду и взвешивают. Затем пикнометр освобождают от содержимого, промывают, наполняют до метки дистиллированной водой и снова взвешивают.

Истинную плотность песка вычисляют с точностью до  $0,01\text{г/см}^3$  :

$$\rho_{\text{п}} = (m - m_1) \rho_{\text{в}} / (m - m_1 + m_2 - m_3), \quad (37)$$

где  $m$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  — масса, г, пикнометра с песком, пустого пикнометра, пикнометра с дистиллированной водой и с дистиллированной водой после удаления пузырьков воздуха;  $\rho_{\text{в}}$  — плотность воды, равная  $1 \text{ г/см}^3$ .

Определение считают законченным, если расхождение между двумя результатами не превышает  $0,02 \text{ г/см}^3$ . При больших расхождениях истинную плотность песка определяют вторично. За окончательный результат принимают среднее арифметическое определение плотности обеих навесок.

### 3.2.2. Определение истинной плотности цемента

Истинную плотность цемента определяют с помощью объемметра — прибора Ле-Шателье (рис. 5).

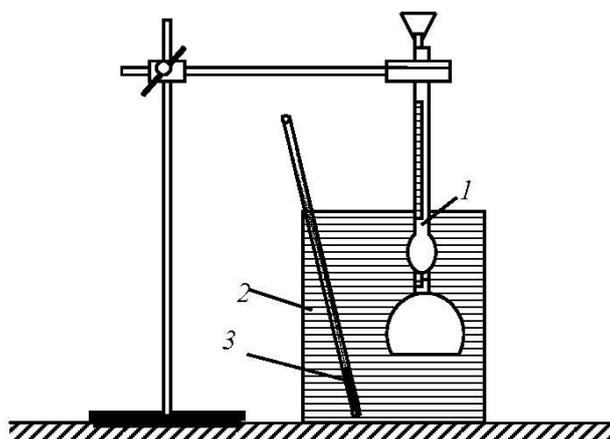


Рис. 5. Прибор для определения истинной плотности цемента: 1 — объемметр; 2 — сосуд с водой; 3 — термометр

Объемметр, закрепленный в штатив, помещают в стеклянный сосуд с водой так, чтобы вся его градуированная часть была погружена в воду. Необходимо, чтобы при отсчетах уровня жидкости в приборе температура воды в сосуде соответствовала температуре, при которой производили градуировку прибора. Прибор наполняют обезвоженным керосином до нижней черты по нижнему мениску. После этого часть прибора (выше нулевой черты), свободную от керосина, тщательно протирают тампоном из фильтрованной бумаги.

Для испытания используют пробу цемента, предварительно высушенную в сушильном шкафу при температуре  $105...110 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 2 ч и охлажденную в эксикаторе. От этой пробы с точностью до  $0,01 \text{ г}$  отвешивают  $65 \text{ г}$  и высыпают в прибор ложечкой через воронку небольшими порциями. После того как вся проба цемента засыпана в прибор, уровень жидкости в приборе поднимается до одного из делений в пределах верхней градуированной части. Для удаления пузырьков воздуха, которые могут удерживаться на частицах цемента, прибор вынимают из сосуда с водой и в наклонном положении поворачивают в течении 10 мин на гладком резиновом коврике. После этого прибор снова помещают в сосуд с водой. Затем производят отсчет уровня жидкости в приборе.

Истинная плотность цемента  $\rho_{\text{ц}}$ ,  $\text{г/см}^3$ , вычисляется по формуле

$$\rho_{\text{ц}} = m / V, \quad (38)$$

где  $m$  — масса цемента, засыпанная в прибор, г;  $V$  — объем цемента или жидкости, вытесненной цементом (определяют как разность отсчетов по шкале после засыпки и до засыпки),  $\text{см}^3$ .

Для определения истинной и насыпной плотности проводят два испытания одного и того же цемента, из полученных результатов вычисляют среднее арифметическое. Расхождение между определениями не должно превышать  $0,02 \text{ г/см}^3$ . При большей разнице испытания проводят до тех пор, пока это условие не будет выполнено.

### **3.2.3. Определение консистенции цементного раствора**

Определение и корректировку консистенции бетонной смеси осуществляют для каждого опыта эксперимента [6].

Отвешивают 500 г песка и 250 г цемента, высыпают их в предварительно протертую мокрой тканью сферическую чашу, перемешивают цемент с песком лопатой в течение 1 мин.

Температуру помещения устанавливают по [5]. Затем в центре сухой смеси делают лунку, вливают в нее воду в количестве 100 г. ( $V/C = 0,4$ ), дают воде впитаться в течение 0,5 мин и перемешивают смесь в течение 1 мин.

Испытание подвижности смеси осуществляется на вибростанке при помощи стандартного прибора — конуса с диаметром нижнего основания 100 мм. Форму-конус устанавливают в центре диска встряхивающего столика.

Внутреннюю поверхность конуса и диск столика перед испытанием протирают влажной тканью. По окончании перемешивания заполняют раствором форму-конус на половину высоты и уплотняют 15 штыкованиями металлической штыковкой. Затем наполняют конус раствором с небольшим избытком и штыкуют 10 раз.

После уплотнения верхнего слоя избыток раствора срезают ножом вровень с краями конуса, затем конус снимают в вертикальном направлении.

Раствор встряхивают на столике 30 раз за  $(30 \pm 5)$  с, после чего измеряют диаметр конуса по нижнему основанию в двух взаимно перпендикулярных направлениях и берут среднее значение. Расплыв конуса с  $V/C = 0,4$  должен быть в пределах 106...115 мм.

Если расплыв конуса окажется менее 106 мм, количество воды увеличивают для получения расплыва конуса 106...108 мм. Если расплыв конуса окажется более 115 мм, количество воды уменьшают для получения расплыва конуса 113...115 мм.

Водоцементное отношение, полученное при достижении расплыва конуса 106...115 мм, принимают для проведения данного опыта.

### **3.2.4. Определение предела прочности при изгибе**

Определение предельной прочности на изгиб производится при помощи установки МИИ-100 [6]. Образец устанавливают на опорные элементы прибора таким образом, чтобы его горизонтальные грани находились в вертикальном положении. Схема расположения образца на опорных элементах показана на рис. 6.

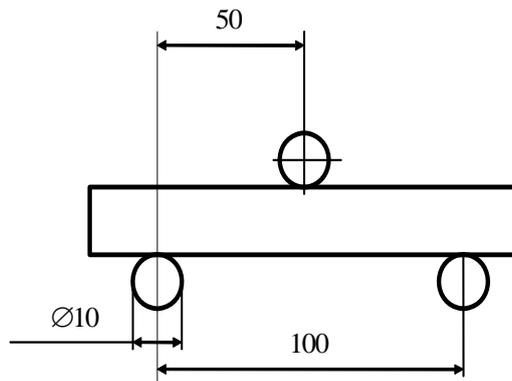


Рис. 6. Схема расположения образца на опорных элементах при испытаниях на изгиб

Испытание образцов производят в соответствии с инструкцией, приложенной к прибору.

### 3.2.5. Определение пределов прочности при сжатии

Определение предельной прочности на сжатие производится на прессе МУП-20. Полученные после испытания на изгиб шесть половинок балочек сразу же подвергают испытанию на сжатие. Половинку балочки помещают между двумя пластинками таким образом, чтобы боковые грани, которые при изготовлении прилегали к стенкам формы, находились на плоскостях пластинок, а упоры пластинок прилегали к торцевой гладкой плоскости образца (рис. 7).

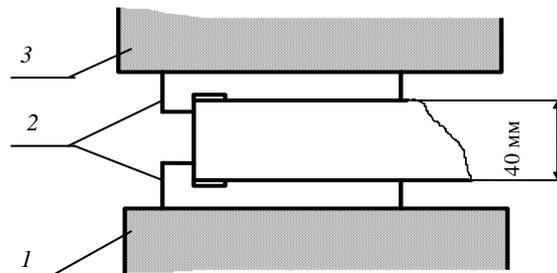


Рис. 7. Схема расположения образца на опорных элементах при испытаниях на сжатие: 1 — нижняя плита пресса; 2 — пластинки; 3 — верхняя плита пресса

Образец вместе с пластинами центрируют на опорной плите пресса. Средняя скорость нарастания нагрузки при испытании должна быть  $(20 \pm 5)$  кгс/см<sup>2</sup> в секунду.

Предел прочности при сжатии отдельного образца вычисляют как частное от деления величины разрушающей нагрузки, кгс, на рабочую площадь пластинки, см<sup>2</sup>, т. е. на 25 см<sup>2</sup>. Предел прочности при сжатии вычисляют как среднее арифметическое значение четырех наибольших результатов испытания шести образцов.

### 3.2.6. Определение истинной плотности зерен щебня (гравия)

Истинную плотность зерен щебня (гравия) определяют пикнометрическим методом [14]. Для этого отбирают среднюю пробу, масса которой должна составлять:

- при наибольшей крупности зерен 10 мм — 0,5 кг;
- 20 мм — 1 кг;
- 40 мм — 2,5 кг;
- 70 мм — 5 кг.

Зерна отобранной пробы очищают щеткой от грязи и пыли, затем дробят до зерен размером 5 мм и сокращают квартованием до 150 г, подвергая повторному измельчению до зерен размером 1,25 мм. Эту пробу сокращают до массы 30 г, растирают в чугунной или фарфоровой ступке, насыпают в бюкс и высушивают в сушильном шкафу при температуре  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$  до постоянной массы, после чего охлаждают в эксикаторе над концентрированной серной кислотой или безводным хлористым кальцием. В эксикаторе пробу хранят до момента испытания. Испытанию подвергают две навески по 10 г каждая, отвешенные на аналитических весах. Каждую навеску высыпают в чистый высушенный пикнометр и наливают в него дистиллированную воду в таком количестве, чтобы пикнометр был заполнен не более чем на половину своего объема, затем пикнометр в слегка наклонном положении ставят на песчаную ванну или в водяную баню и кипятят его содержимое в течение 15...20 мин для удаления пузырьков воздуха (пузырьки воздуха могут быть удалены также путем выдерживания пикнометра под вакуумом в эксикаторе). После удаления воздуха пикнометр обтирают, охлаждают до комнатной температуры, доливают до метки дистиллированную воду и взвешивают. Затем пикнометр освобождают от содержимого, промывают, наполняют до метки дистиллированной водой комнатной температуры и взвешивают.

Истинную плотность ( $\rho$ ),  $\text{г/см}^3$ , вычисляют по формуле

$$\rho = \frac{m\rho_g}{m + m_1 - m_2}, \quad (39)$$

где  $m$  — масса навески порошка, высушенного до постоянной массы, г;  $m_1$  — масса пикнометра с дистиллированной водой, г;  $m_2$  — масса пикнометра с навеской дистиллированной водой после удаления пузырьков воздуха, г;  $\rho_g$  — плотность воды, равная  $1 \text{ г/см}^3$ .

Расхождение между результатами двух определений не должно быть более  $0,02 \text{ г/см}^3$ . В случае больших расхождений производят третье определение и принимают для расчета два ближайших значения.

За результат принимают среднее арифметическое значение двух параллельных испытаний.

В случае необходимости определения истинной плотности щебня (гравия), состоящего из смеси фракций, ее значение вычисляют как среднее взвешенное испытание отдельных фракций [13, 14]. Испытание ведут по методике (прил. 5). Плотность зерен щебня (гравия) вычисляют как среднее арифметическое двух определений.

### 3.2.7. Определение насыпной плотности щебня (гравия)

Насыпную плотность щебня (гравия) необходимо знать для расчета состава бетона, определения пустотности крупного заполнителя, а также для расчетов, связанных с перевозкой щебня (гравия), проектированием складов крупного заполнителя и т. д. Насыпную плотность определяют при помощи мерного цилиндра, объем которого зависит от крупности щебня (гравия). Например, при наибольшей крупности щебня (гравия) 10 мм объем мерного цилиндра должен быть 5 л, при крупности 20 мм — 10 л, 40 мм — 20 л, свыше 40 мм — 50 л. Предназначенный для испытания щебень (гравий) в необходимом количестве высушивают до постоянной массы и охлаждают. Щебень (гравий) насыпают совком с высоты 10 см в предварительно взвешенный мерный цилиндр до образования конуса над краями цилиндра. Излишек щебня (гравия) срезают стальной линейкой вровень с краями, цилиндр со щебнем (гравием) взвешивают и вычисляют насыпную плотность с точностью до  $10 \text{ кг/м}^3$  по формуле

$$\rho_m = (m_1 - m_2) / V, \quad (40)$$

где  $m_1$  — масса цилиндра с заполнителем, кг;  $m_2$  — масса цилиндра, кг;  $V$  — объем цилиндра,  $\text{м}^3$ .

Насыпную плотность щебня (гравия) определяют два раза (при этом каждый раз берут новую порцию) и вычисляют среднее арифметическое двух определений.

### 3.2.8. Определение пустотности щебня (гравия)

Пустотность щебня (гравия) определяют по предварительно найденным значениям средней и насыпной плотности щебня (гравия) [14]. Пустотность  $V_n$ , %, по объему вычисляют с точностью до 0,1 % по формуле

$$V_n = [1 - (\rho_n / \rho_m)] 100, \quad (41)$$

где  $\rho_n$  — насыпная плотность щебня (гравия),  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_m$  — истинная плотность зерен щебня (гравия),  $\text{кг/м}^3$ .

### 3.2.9. Определение влажности щебня (гравия)

Для определения влажности щебня (гравия) берут пробу испытываемого заполнителя в определенном количестве в зависимости от его наибольшей крупности [14]. Например, при наибольшей крупности заполнителя 20 мм берут навеску 1 кг, 40 мм — 2,5 кг, 70 мм — 5 кг.

Пробу заполнителя в состоянии естественной влажности взвешивают, после чего помещают в плоский сосуд и высушивают в сушильном шкафу до постоянной массы. Затем пробу заполнителя охлаждают и взвешивают. Влажность щебня (гравия)  $W$ , %, вычисляют по формуле

$$W = [(m_1 - m_2) / m_2] 100, \quad (42)$$

где  $m_1$  — масса пробы в состоянии естественной влажности, г;  $m_2$  — масса пробы в сухом состоянии, г.

Влажность щебня (гравия) вычисляют как среднее арифметическое двух определений.

### 3.2.10. Определение зернового состава щебня (гравия)

Зерновой состав щебня (гравия) определяют путем отсева пробы на стандартном наборе сит.

Для испытания в качестве аналитической пробы используют лабораторную пробу по табл. 13, высушенную до постоянной массы, без ее сокращения.

Таблица 13

Масса лабораторной пробы

Наибольший номинальный размер зерен $D$ , мм	10	20	40	Свыше. 40
Масса пробы, кг	5,0	10,0	20,0	40,0

Пробу просеивают ручным или механическим способами через сита с отверстиями указанных выше размеров, собранными последовательно в колонку, начиная снизу с сита с отверстиями наименьшего размера, при этом толщина слоя щебня (гравия) на каждом из сит не должна превышать наибольшего размера зерен щебня (гравия).

Продолжительность просеивания должна быть такой, чтобы при контрольном интенсивном ручном встряхивании каждого сита в течение 1 мин через него проходило не более 0,1 % общей массы просеиваемой навески. При механическом просеивании его продолжительность для применяемого прибора устанавливают опытным путем.

При ручном просеивании допускается определять окончание просеивания следующим упрощенным способом: каждое сито интенсивно трясут над листом бумаги. Просеивание считают законченным, если при этом практически не наблюдается падение зерен щебня (гравия).

При определении зернового состава мокрым способом навеску материала помещают в сосуд и заливают водой. Через 24 ч содержимое сосуда тщательно перемешивают до полного размокания глинистой пленки на зернах или комков глины, сливают (порционно) на верхнее сито стандартного набора и просеивают, промывая материал на ситах до тех пор, пока промывочная вода не станет прозрачной. Частные остатки на каждом сите высушивают до постоянной массы и охлаждают до комнатной температуры, затем определяют их массу взвешиванием.

Рассев несортированного щебня (гравия), а также песчано-гравийной смеси производят с применением полного набора стандартных сит.

По результатам просеивания вычисляют частный остаток на каждом сите  $a_i$ , %, по формуле

$$a_i = \frac{m_i}{m} 100, \quad (43)$$

где  $m_i$  — масса остатка на данном сите, г;  $m$  — масса пробы, г.

Затем определяют полные остатки  $A_i$ , на каждом сите, %, равные сумме частных остатков на данном и всех ситах с большими размерами отверстий:

$$A_i = a_i + a_{i+1} + a_{i+2} + \dots + a_n,$$

где  $a_i, a_{i+1}, a_{i+2}, \dots, a_n$  — частные остатки на  $i$ -м сите и всех ситах стандартного набора с большими размерами отверстий;  $i, i+1, i+2, \dots, n$  — порядковые номера сит стандартного набора.

При определении зернового состава сухим способом сумма частных остатков на ситах и проходах через нижнее сито не должны отличаться больше чем на 2 % от массы навески, определяемой перед испытанием. В случае выполнения этого условия для расчета частного остатка вместо значения массы навески  $m$  используют сумму частных остатков на ситах и проход. При большей величине указанной разности испытание проводят вторично.

При испытании гравия, загрязненного глиной, рассев производят с промывкой водой [13, 14].

### 3.2.11. Определение влажности песка

Влажность песка определяют следующим образом [12]. От средней пробы песка берут две навески массой не менее 500 г, взвешивают с точностью до 1 г и помещают каждую в отдельный плоский сосуд, затем высушивают в сушильном шкафу при температуре  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$  до постоянной массы. В процессе высушивания песок рекомендуется через каждые 30 мин перемешивать металлическим совком.

После достижения постоянной массы песок охлаждают и взвешивают. Влажность песка  $W$ , % по массе, вычисляют по формуле

$$W = \left[ (m_1 - m_2) / m_2 \right] 100, \quad (44)$$

где  $m_1$  — масса пробы влажного песка, кг;  $m_2$  — масса пробы сухого песка, кг.

Влажность песка вычисляют как среднее арифметическое влажности двух проб.

### 3.2.12. Определение насыпной плотности керамзита

Насыпную плотность определяют по массе и объему высушенной до постоянной массы пробы, насыпанной в мерный сосуд, без уплотнения, с заданной высоты [13].

Отбирают лабораторную пробу заполнителя испытываемой фракции (смеси фракций) объемом 5...40 л в зависимости от размера фракции (табл. 14) и высушивают до постоянной массы.

Таблица 14

**Объем лабораторной пробы, отбираемой для испытания**

Наименование показателя	Заполнитель фракций, мм				
	0...5	5...10	10...20	20...40	40...70
Объем лабораторной пробы, л	5	10	20	40	40

Лабораторную пробу (см. табл. 14) насыпают в предварительно взвешенный мерный сосуд с высоты 100 мм от его верхнего края до образования над верхом сосуда конуса, который удаляют металлической линейкой вровень с краями сосуда (без уплотнения) и взвешивают. Пористый песок насыпают в мерный сосуд через воронку.

Размеры мерного сосуда для испытания заполнителя в лабораторных условиях в зависимости от наибольшей крупности зерен заполнителя принимают по табл. 15.

Таблица 15

**Размеры мерного сосуда в зависимости от крупности зерен заполнителя**

Наибольшая крупность зерен заполнителя, мм	Объем мерного сосуда, л	Размер сосуда, мм	
		Диаметр	Высота
5 и менее	1	108	108,5
10	2	137	136,5
20	5	185	186,5
40	10	234	233,8
70	10	234	233,8

Насыпную плотность заполнителя ( $\rho_n$ ), кг/м, вычисляют с точностью до 10 кг/м (для пористого песка марок по насыпной плотности 250 и менее — до 1 кг/м) по формуле

$$\rho_n = (m_1 - m_2) / V, \quad (45)$$

где  $m_1$  — масса мерного сосуда с заполнителем, кг;  $m_2$  — масса мерного сосуда, кг;  $V$  — объем мерного сосуда, л.

Предельное допустимое расхождение между результатами двух испытаний должно быть не более 5 %.

Насыпную плотность заполнителя рассчитывают как среднеарифметическое значение результатов двух параллельных испытаний, при проведении которых каждый раз используют новую пробу заполнителя.

### 3.2.13. Определение прочности керамзита

Прочность заполнителя при сдавливании в цилиндре определяют по нагрузке, соответствующей погружению пуансона на 20 мм в слой испытуемой пробы заполнителя.

Прочность при сдавливании в цилиндре крупного заполнителя определяют для фракций 5...10; 10...20; 20...40 и 40...70 мм.

Для испытания используется стальной составной цилиндр (рис. 8)

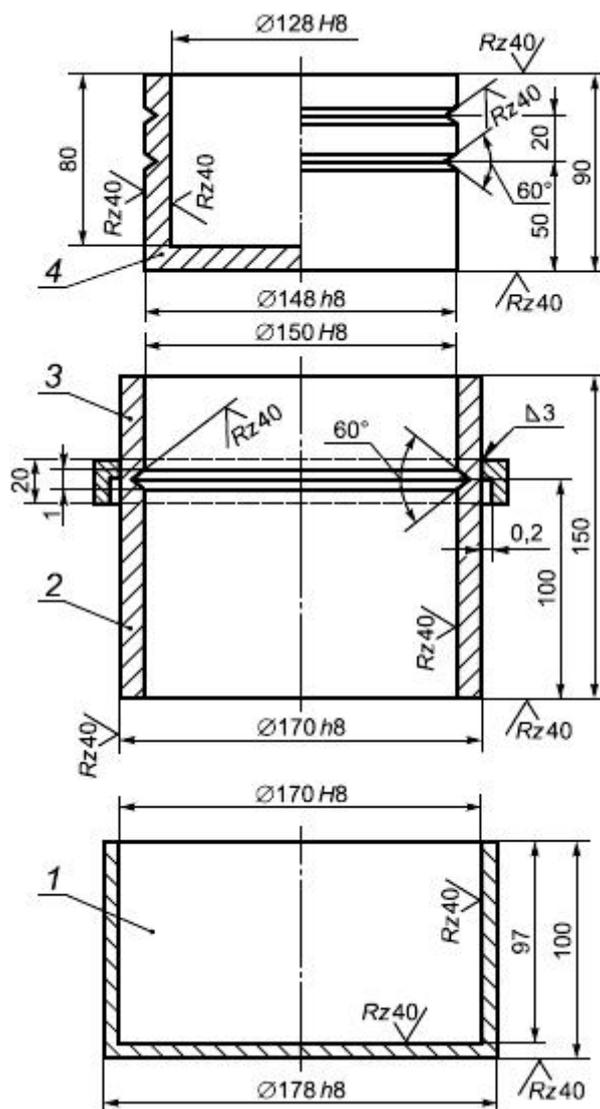


Рис. 8. Составной стальной цилиндр:  
1 — поддон; 2 — цилиндр; 3 — приставка;  
4 — пуансон

Лабораторную пробу заполнителя испытуемой фракции объемом 6 л, на которой определялась насыпная плотность, высушивают до постоянной массы в сушильном электрошкафу.

Из высушенной лабораторной пробы отвешивают навеску объемом 2 л и совком насыпают ее с высоты 100 мм в стальной цилиндр с поддоном так, чтобы после разравнивания металлической линейкой верхний уровень за-

полнителя доходил до верхнего края цилиндра. Затем на цилиндр надевают приставку и в нее вставляют пуансон. При этом нижняя риска пуансона должна совпадать с верхним краем приставки.

Остаток заполнителя, не вошедший в цилиндр, взвешивают и по разности масс взятой навески и остатка определяют массу заполнителя в цилиндре. Насыпную плотность заполнителя в цилиндре определяют делением массы заполнителя на его объем в цилиндре (1770 см).

Если отклонения полученных значений насыпной плотности от насыпной плотности испытуемой фракции превышают  $-4...+2$  % для пористого песка фракции 1,25...2,5 и гравия или щебня фракций 5...10 и 10...20 мм, и  $-6...+1$  % — для фракции гравия или щебня фракции 20...40 мм, то повторно определяют насыпную плотность в цилиндре на другой навеске заполнителя.

Цилиндр с пуансоном помещают на подушку гидравлического пресса, сдавливают заполнитель до погружения пуансона на 20 мм (до верхней риски) и отмечают показание манометра в этот момент.

Вдавливание пуансона должно проводиться без перекоса со скоростью 0,5...1,0 мм/с.

Прочность при сдавливании заполнителя в цилиндре  $R_{сд}$ , МПа (кгс/см<sup>2</sup>), вычисляют по формуле

$$R_{сд} = P / F \quad (46)$$

где  $P$  — нагрузка при сдавливании заполнителя, соответствующая погружению пуансона на 20 мм (до верхней риски), Н (кгс);  $F$  — площадь поперечного сечения цилиндра, равная 177 см.

Прочность заполнителя отдельной фракции при сдавливании в цилиндре вычисляют для каждой фракции заполнителя как среднеарифметическое значение результатов двух параллельных испытаний этой фракции.

### **3.3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СВОЙСТВ МИНЕРАЛЬНОГО ВЯЖУЩЕГО (ЦЕМЕНТА)**

#### **3.3.1. Содержание и основные характеристики работы**

**Цель работы.** Исследование технологических режимов улучшения свойств вяжущего (цемента) в лабораторной мельнице ЛИВ-2.

**Задачи, решаемые в ходе выполнения работы:**

описание параметров эксперимента (выделение контролируемых и неконтролируемых, управляемых и неуправляемых факторных переменных, результативных признаков);

выбор методов исследования;

составление плана эксперимента;

получение экспериментальных данных;

обработка экспериментальных данных методами математической статистики;

формирование основных выводов и предложений по результатам проведения исследований.

**Описание объекта исследования.** Для восстановления свойств вяжущего (цемента) используется лабораторная электромагнитная мельница (ЛИВ-1). В камере установки происходит обработка материала мелющими телами, движущимися под воздействием вращающегося электромагнитного поля.

Под улучшением (восстановлением) свойств цемента в процессе его обработки в лабораторной мельнице подразумевается увеличение активной поверхности обрабатываемого материала (удельного модуля поверхности вяжущего) под воздействием движущихся в среде материала мелящих тел, что обеспечивает улучшение качественных характеристик вяжущего.

Основными управляемыми переменными факторами технологического режима улучшения свойств цемента (зависимыми факторными переменными) являются:

время обработки материала в мельнице  $t$ ;

объем заполнения камеры материалом  $V$ ;

вид материала, из которого изготовлены мелящие тела (что определяет ферромагнитные свойства мелящих тел, находящихся под воздействием электромагнитного поля);

длина мелящих тел  $l$ ;

диаметр мелящих тел  $d$ ;

количество мелящих тел  $m$ ;

К неконтролируемым постоянным технологическим факторам процесса улучшения свойств цемента относятся такие параметры функционирования мельницы электромагнитного действия (ЛИВ-1), как:

частота электромагнитного поля;

объем активной зоны электромагнитного воздействия —  $1,25 \text{ дм}^3$ ;

потребляемая активная мощность — не более  $2,8 \text{ кВт}$ ;

частота вращения генератора электромагнитного поля.

Так как кроме процесса восстановления свойств цемента в мельнице электромагнитного действия (ЛИВ) эксперимент предполагает приготовление и исследование свойств образцов, изготовленных с использованием активизированного вяжущего, то в качестве факторов, определяющих чистоту эксперимента, включаются:

1) характеристики составляющих цементно-песчаной смеси:

влажность вяжущего (цемента);

гранулометрический состав песка;

химический состав песка;

влажность песка;

2) технологические характеристики цементно-песчаного раствора:

время схватывания цементного теста;

пластичность раствора;

3) технологические параметры изготовления образцов:

продолжительность вибрационной обработки уложенного в формочки бетонного раствора;

время выдерживания образцов в гидравлической ванне;

4) технологические параметры испытательных приборов:

соответствие номинальной и фактической нагрузки, передаваемой испытательными приборами на образцы;

интенсивность разрушающей нагрузки на образцы.

Перечисленные выше факторы относятся к контролируемым переменным факторам, оказывающим влияние на результативные признаки процесса восстановления свойств цемента, которые должны быть установлены на неизменном уровне для всех опытов.

К контролируемым результативным признакам (зависимым переменным) процесса улучшения свойств цемента относятся:

активность цемента (прочность образцов-балочек на сжатие в соответствии с [6] —  $R_{сж}$ ;

энергозатраты на процесс восстановления свойств вяжущего (цемента), определяемые продолжительностью обработки материала в мельнице, кВт/ч;

показатели, характеризующие эффективность процесса улучшения свойств вяжущего (цемента), т. е. отношение разницы в стоимости активизированного и неактивированного вяжущего к энергозатратам на процесс восстановления свойств цемента в стоимостном выражении,  $E$ .

Показатель, характеризующий эффективность процесса восстановления свойств цемента  $E$ , рассчитывается по следующей формуле:

$$E_i = \frac{C_i m_i - C_{i0} m_i}{n_i C_n}, \quad (47)$$

где  $E_i$  — эффективность восстановления свойств цемента в  $i$ -м опыте;  $C_i$  — стоимость 1 кг цемента, прошедшего процесс восстановления в  $i$ -м опыте (активизированного цемента);  $m_i$  — количество цемента, прошедшего обработку в мельнице в  $i$ -м опыте, кг;  $C_{i0}$  — стоимость 1 кг исходного цемента (неактивизированного);  $n_i$  — энергозатраты на процесс восстановления цемента в  $i$ -м опыте, кВт/ч;  $C_n$  — стоимость электроэнергии, кВт/ч.

**Выбор предмета и методов исследования.** Целью исследования в рамках данной работы является определение технологических режимов улучшения свойств цемента с использованием лабораторной мельницы (ЛИВ-1). В качестве предмета исследования могут выступать те или иные аспекты технологии обработки материала в мельнице, связанные с продолжительностью обработки материалов, объемом заполнения камеры, видом материала, из которых изготовлены мелящие тела, размером мелящих тел и их количеством и т. д.

Так как эксперимент относится к многофакторному типу, то следует выбрать один из методов планирования факторных эксперимента (ПФЭ или ДФЭ — полный план или дробный план факторного эксперимента соответственно).

В качестве методов математической обработки результатов исследования рекомендуется выбрать один из методов построения многофакторных математических моделей (например, метод наименьших квадратов).

### **3.3.2. Указания к выполнению экспериментальной части**

#### **3.3.2.1. Приборы и материалы, необходимые для проведения работы**

Для проведения работы необходимы следующие приборы и материалы:  
мельница лабораторная ЛИВ с комплектом мелящих тел;  
технические весы с разновесами РН-10Ц13У;  
лопатка для перемешивания;  
конус для определения пластичности раствора;  
сферическая чашка;  
встряхивающий столик;  
штыковка;  
электрический вибростол;  
мерный цилиндр;  
прибор «Вика ОГЦ-1»;  
набор лабораторных сит;  
формы для приготовления образцов-балочек;  
пресс для исследования образцов на сжатие МУП-20;  
прибор для определения прочности на изгиб МИИ-100 конструкции Гипрцемент (а/с 140240).

#### **3.3.2.2. Расчет расхода материалов**

**Расход растворной смеси.** Расход растворной смеси на один образец:

$$B_{об} = \rho_{бет} V_{об}, \quad (48)$$

где  $\rho_{бет}$  — средняя плотность раствора;  $V_{об}$  — объем образца (стандартный размер формочки для одного образца —  $0,04 \times 0,04 \times 0,16 = 0,000256 \text{ м}^3$ ).

Расход растворной смеси на один опыт равен

$$B_{оп} = B_{об} n, \quad (49)$$

где  $B_{об}$  — расход растворной смеси на один образец;  $n$  — количество образцов, изготавливаемых в одном опыте (согласно рекомендациям нормативных документов  $n = 6$ )

Расход растворной смеси на весь эксперимент равен

$$B_{эксп} = 1,2 B_{оп} N, \quad (50)$$

где  $B_{оп}$  — расход растворной смеси на один опыт;  $N$  — общее количество опытов в эксперименте; 1,2 — коэффициент, учитывающий необходимость проведения опытов для определения и корректировки консистенции цементного теста.

**Расход составляющих смеси на проведение всего эксперимента.** Расход цемента на весь эксперимент равен

$$\Pi = \frac{B_{\text{эксп}}}{\Pi_{\text{н}} + \Pi_{\text{п}} + B_{\text{н}}} \Pi_{\text{н}}, \quad (51)$$

где  $B_{\text{эксп}}$  — расход растворной смеси на весь эксперимент;  $\Pi_{\text{н}}$ ,  $\Pi_{\text{п}}$ ,  $B_{\text{н}}$  — нормативные показатели соотношения компонентов бетонной смеси, т. е. цемента, песка и воды (нормативное соотношение составляющих растворной смеси —  $\Pi_{\text{н}} : \Pi_{\text{п}} : B_{\text{н}} = 1 : 3 : 0,4$ ).

Расход песка на весь эксперимент равен

$$\Pi_{\text{п}} = \frac{B_{\text{эксп}}}{\Pi_{\text{н}} + \Pi_{\text{п}} + B_{\text{н}}} \Pi_{\text{п}}. \quad (52)$$

Расход воды на весь эксперимент равен

$$B = \frac{B_{\text{эксп}}}{\Pi_{\text{н}} + \Pi_{\text{п}} + B_{\text{н}}} B_{\text{н}}. \quad (53)$$

**Расход составляющих смеси на проведение одного опыта.** Расход цемента на проведение одного опыта:

а) расход цемента на изготовление образцов находим как

$$\Pi_i = \frac{B_{\text{оп}}}{\Pi_{\text{н}} + \Pi_{\text{п}} + B_{\text{н}}} \Pi_{\text{н}}, \quad (54)$$

где  $I$  — номер опыта ( $I = 1, 2, \dots, N$ );  $B_{\text{оп}}$  — расход растворной смеси на проведение одного опыта;  $\Pi_{\text{н}}$ ,  $\Pi_{\text{п}}$ ,  $B_{\text{н}}$  — нормативные показатели соотношения компонентов бетонной смеси (нормативное соотношение составляющих растворной смеси —  $\Pi_{\text{н}} : \Pi_{\text{п}} : B_{\text{н}} = 1 : 3 : 0,4$ );

б) расход цемента на проведение опыта по определению консистенции цементного теста равен

$$\Pi_{\text{кон } I} = 0,2\Pi_i. \quad (55)$$

**Расход песка на проведение одного опыта:**

а) расход песка на изготовление образцов:

$$\Pi_{\text{п } i} = \frac{B_{\text{оп}}}{\Pi_{\text{н}} + \Pi_{\text{п}} + B_{\text{н}}} \Pi_{\text{п}}; \quad (56)$$

б) расход песка на проведение опыта по определению консистенции цементного теста:

$$\Pi_{\text{кон } I} = 0,2\Pi_{\text{п } i}. \quad (57)$$

### Расход воды на проведение одного опыта:

а) расход воды на изготовление образцов равен

$$V_i = \frac{B_{\text{оп}}}{C_{\text{н}} + П_{\text{н}} + V_{\text{н}}} V_{p i}, \quad (58)$$

где  $V_{p i}$  — расчетное значение водоцементного отношения, определяемое по результатам проверки и корректировки консистенции цементного теста;

б) расход воды на проведение опыта по определению консистенции цементного теста:

$$V_{\text{кон}i} = \frac{B_{\text{оп}}}{C_{\text{н}} + П_{\text{н}} + V_{\text{н}}} V_{\text{н} 0,2}. \quad (59)$$

Песок следует подготовить заранее, в количестве необходимом для проведения всего эксперимента, и дать ему отлежаться для приобретения постоянной влажности.

### 3.3.2.3. Планирование эксперимента

В качестве факторных признаков, влияющих на результаты эксперимента (активность цемента) берутся: время обработки минерального вяжущего (цемента) в камере —  $x_1$ , с, объем заполнения камеры материалом —  $x_2$ , %, и количество мелящих тел —  $x_3$ , г.

В работе применяется факторный эксперимент.

Планирование осуществляется на трех уровнях — верхнем (+1), основном (0) и нижнем (–1). Верхний и нижний отстоят от основного на одинаковую величину, называемую интервалом варьирования. Рекомендуемые значения факторов представлены в табл. 16.

Таблица 16

Основные характеристики плана эксперимента

Характеристика	$X_1$ , с	$X_2$ , %	$X_3$ , г
Основной уровень	40	90 (0,9)	80
Интервал варьирования	20	0,1	20
Верхний уровень	60	1,0	100
Нижний уровень	20	0,8	60

При использовании полного факторного эксперимента, при трех уровнях исследования каждого фактора, необходимо в общей сложности провести 29 опытов (27 с учетом перебора всех возможных взаимодействий факторных признаков и дополнительно два опыта на основном уровне варьирования факторных признаков для определения дисперсии воспроизводимости эксперимента по трем параллельным опытам на основном уровне исследования факторов). Это является достаточно трудоемкой работой. Однако представляется возможным применение сокращенного плана проведения эксперимен-

та. Для этого в плане проведения эксперимента перебор факторных признаков осуществляется на верхнем и нижнем уровне и дополнительно вводятся три опыта на основном уровне варьирования для подсчета дисперсии воспроизводимости, а также для наглядного изображения результатов эксперимента по трем точкам (значениям результативного признака для факторных признаков, установленных на нижнем, основном и верхнем уровне исследования факторов), что дало бы возможность без предварительного перебора определить тип регрессионной зависимости между факторными и результативным признаками (табл. 17).

Таблица 17

**Сокращенный факторный план проведения эксперимента**

Число опытов	Номер опыта	Матрица планирования			Свойства
		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_i$
1	2	3	4	5	9
N	1	+1	+1	+1	
	2	+1	+1	-1	
	3	+1	-1	+1	
	4	+1	-1	-1	
	5	-1	+1	+1	
	6	-1	+1	-1	
	7	-1	-1	+1	
	8	-1	-1	-1	
	9.1	0	0	0	
	9.2	0	0	0	
	9.3	0	0	0	

### **3.3.2.4. Определение консистенции цементного раствора**

Определение и корректировку консистенции растворной смеси осуществляют для каждого опыта эксперимента, используя методику, представленную в прил. 5.

Водоцементное отношение,  $V_{pi}$  соответствующее нормальной консистенции бетонной смеси (расплыв конуса 106...115 мм), рассчитывается следующим образом:

$$V_{pi} = \frac{Ц_{ki}}{B_{ki}}, \quad (60)$$

где  $Ц_{ki}$ ,  $B_{ki}$  — расход соответственно цемента и воды в  $i$ -м опыте при достижении расплыва конуса 106...115 мм.

Результаты проведения опытов по определению консистенции цементного теста заносятся в табл. 18.

**Результаты проведения опытов по определению консистенции цементного теста**

Номер опыта	Нормативное соотношение Ц <sub>н</sub> /П <sub>н</sub> /В <sub>н</sub>	Опыты по определению консистенции						Расчетное соотношение Ц/П/В <sub>рi</sub>
		1		2		3		
		(В/Ц) <sub>1</sub>	D <sub>конус</sub>	(В/Ц) <sub>2</sub>	D <sub>конус</sub>	(В/Ц) <sub>3</sub>	D <sub>конус</sub>	
1	1/3/0,4							
2	1/3/0,4							
3	1/3/0,4							
4	1/3/0,4							
5	1/3/0,4							
6	1/3/0,4							
7	1/3/0,4							
8	1/3/0,4							
9	1/3/0,4							

### 3.3.2.5. Методика проведения основного эксперимента

За одно занятие проводится три опыта. Опыты включают в себя следующие этапы:

активизацию цемента (технологические режимы принимаются в соответствии с планом проведения эксперимента);

корректировку состава растворной смеси;

изготовление образцов;

определение прочностных характеристик образцов через соответствующее время.

Откорректированные данные по потребности в материалах на каждый опыт заносятся в табл. 19.

Таблица 19

**Потребность в материалах для *i*-го опыта**

Номер опыта по матрице планирования	Материалы	Потребность в материалах для <i>i</i> -го опыта		
		на определение консистенции цементного теста	на изготовление образцов	Всего
1	Всего смеси, кг	$Ц_{кон i} + П_{кон i} + В_{кон i}$	$Ц_i + П_i + В_i$	$5 = 3 + 4$
	Песка, кг	$Ц_{кон i}$	$Ц_i$	$5 = 3 + 4$
	Цемент, кг	$П_{кон i}$	$П_i$	$5 = 3 + 4$
	Вода, л	$В_{кон i}$	$В_i$	$5 = 3 + 4$

**Подготовка материалов.** От подготовленного заранее песка отмеряем три равные порции в соответствии с табл. 18.

Цемент в количестве, необходимом для проведения трех опытов, просеивается через сито  $\varnothing 0,9$  [5].

**Активизация цемента.** Готовятся три порции мелящих тел по плану проведения соответствующих опытов.

Порции поочередно подвергаются активизации в соответствии с планом эксперимента.

Извлечение мелящих тел из цемента, прошедшего активизацию, производится при помощи магнита.

**Приготовление смеси.** Приготовление смеси производится согласно прил. 5.

**Изготовление образцов.** Перед изготовлением образцов внутреннюю поверхность стенок форм и поддона слегка смазывают машинным маслом. Стыки наружных стенок друг с другом и с поддоном формы промазывают тонким слоем солидола или другой густой смазки [6].

Для уплотнения раствора форму балочек с насадкой жестко закрепляют в центре виброплощадки. Допускается устанавливать две формы, симметрично расположенные относительно центра виброплощадки.

Форму по высоте наполняют приблизительно на 1 см раствором и включают вибрационную площадку.

В течение первых двух минут вибрации все три гнезда формы равномерно небольшими порциями заполняются раствором. По истечении трех минут от начала вибрации виброплощадку отключают.

Форму снимают с виброплощадки, срезают ножом, смоченным водой, излишек раствора, заглаживают поверхность образцов вровень с краями формы и маркируют их.

После изготовления образцы в формах хранят ( $24 \pm 2$ ) ч в ванне с гидравлическим затвором.

По истечении времени хранения образцы осторожно расформовывают и укладывают в ванны с водой в горизонтальном положении так, чтобы они не соприкасались друг с другом.

Вода должна покрывать образцы не менее чем на 2 см. Воду меняют каждые 14 сут. При замене ее температура должна быть ( $20 \pm 2$ ) °С, как и при хранении образцов.

По истечении срока хранения образцы вынимают из воды и не позднее чем через 30 мин подвергают испытанию. Непосредственно перед испытанием образцы должны быть насухо вытерты.

**Определение прочностных характеристик образцов.** При наличии готовых образцов, выдержанных в течение принятого срока хранения, проводится определение прочности на изгиб и сжатие на стандартном оборудовании — установке для определения предельной прочности на изгиб марки МИИ-100 и на прессе марки МУП-20, в соответствии с рекомендациями, изложенными в прил. 5, п. 5.4, 5.5.

Экспериментальные данные заносятся в табл. П.2.1 (прил. 2).

Далее осуществляется обработка и анализ экспериментальных данных.

## 3.4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ХРАНЕНИЯ СУХОЙ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ СМЕСИ

### 3.4.1. Содержание и основные характеристики работы

**Цель работы.** Определение зависимости активности цемента от продолжительности хранения сухой цементно-песчаной смеси.

**Задачи, решаемые в ходе выполнения работы:**

описание параметров эксперимента (выделение контролируемых и неконтролируемых, управляемых и неуправляемых факторных переменных, результативных признаков);

выбор методов исследования;

составление плана эксперимента;

получение экспериментальных данных;

обработка экспериментальных данных методами математической статистики;

формирование основных выводов и предложений по результатам проведения исследований.

**Описание объекта исследования.** В данной лабораторной работе предлагается исследовать свойства сухих цементно-песчаных смесей, в частности изменение активности цемента при хранении цементно-песчаной смеси для определения условий хранения сухих цементно-песчаных смесей.

**Выбор предмета и методов исследования.** Предлагается провести следующие исследования в рамках данной работы:

а) определение допустимого срока хранения и зависимости изменения активности цемента от продолжительности хранения сухой цементно-песчаной смеси в полиэтиленовой упаковке;

б) определение допустимого срока хранения и зависимости изменения активности цемента от продолжительности хранения сухой цементно-песчаной смеси в бумажной упаковке;

в) определение допустимого срока хранения и зависимости изменения активности цемента от продолжительности хранения сухой цементно-песчаной смеси в металлической закрытой емкости.

При исследовании продолжительности хранения сухой цементно-песчаной смеси в качестве управляемых факторных переменных выступает продолжительность хранения сухой цементно-песчаной смеси, а в качестве результативного признака — активность цемента. Для обеспечения чистоты эксперимента (исключения помех) необходимо выделить факторы, воздействующие на активность цемента помимо выделенного управляемого фактора, и обеспечить неизменность их воздействия для всех опытов с сухой цементно-песчаной смесью (такими факторами являются влажность компонентов смеси, состав компонентов смеси, консистенция цементного теста, технология изготовления и испытания образцов и т. д.).

В результате экспериментальных исследований требуется определить максимальные сроки хранения сухой цементно-песчаной смеси при различных вариантах и условиях хранения. Для этого необходимо определить рамки допустимого снижения активности цемента при хранении цементно-песчаной смеси. Это позволит определить допустимые сроки хранения сухих цементно-песчаных смесей.

Так как эксперимент однофакторный, то использование специальных методов планирования эксперимента не требуется.

Для обработки экспериментальных данных используются классические методы регрессионного анализа (метод наименьших квадратов).

### **3.4.2. Указания к выполнению экспериментальной части**

#### ***3.4.2.1. Приборы и материалы, необходимые для проведения работы***

Для проведения работы необходимы следующие приборы и материалы:  
мельница лабораторная ЛИВ с комплектом мельящих тел;  
технические весы с разновесами РН-10Ц13У;  
лопатка для перемешивания;  
конус для определения пластичности раствора;  
сферическая чашка;  
встряхивающий столик;  
штыковка;  
электрический вибростол;  
мерный цилиндр;  
прибор «Вика ОГЦ-1»;  
набор лабораторных сит;  
формы для приготовления образцов-балочек;  
пресс для исследования образцов на сжатие МУП-20;  
прибор для определения прочности на изгиб МИИ-100 конструкции Гипрцемент (а/с 140240);  
упаковочные материалы для хранения цементно-песчаной смеси (три полиэтиленовых пакета, три бумажных пакета);  
металлическая герметично закрывающаяся емкость для хранения сухой цементно-песчаной смеси.

#### ***3.4.2.2. Расчет расхода материалов***

Принимаем значение средней плотности раствора  $2300 \text{ кг/м}^3$ . Объем одного образца равен  $0,04 \times 0,04 \times 0,16 = 0,000256 \text{ м}^3$ .

Расход раствора на один образец равен  $2300 \times 0,000256 = 0,589 \text{ кг}$ . Примем с запасом расход раствора на один образец  $0,7 \text{ кг}$ . Тогда расход раствора на один опыт (для проведения одного опыта необходимо подготовить шесть образцов) составляет  $0,7 \times 6 = 4,2 \text{ кг}$ .

Подсчитываем потребность в составляющих смеси на проведение одного опыта в соответствии с пропорцией компонентов смеси 1 : 3 : 0,4:

цемента  $(4,2 / 4,4) 1 = 0,95$  кг;

песка  $(4,2 / 4,4) 3 = 2,86$  кг;

воды  $(4,2 / 4,4) 0,4 = 0,38$  л.

Эксперимент включает в себя 12 опытов. Для каждого из трех вариантов хранения смеси производится по три опыта, при 20-, 40-, 60-дневном сроке хранения сухой цементно-песчаной смеси, а также один опыт для корректировки состава смеси и определения активности цемента до начала хранения и определения дисперсии воспроизводимости эксперимента.

На весь эксперимент расход материалов составляет:

цемента  $0,95 \times 12 = 11,4$  кг;

песка  $2,86 \times 12 = 34,3$  кг.

Материалы необходимо заранее подготовить для проведения эксперимента следующим образом.

Песок в количестве около 35 кг необходимо просеять через сито с диаметром отверстий 2 мм. Песок обрабатывается в сушильной камере при температуре не более 70 °С до приобретения материалом постоянной массы.

Цемент в количестве около 11,5 кг просеивают через сито  $\varnothing 1,25$  мм.

Приготовление и упаковка смеси производится следующим образом. От подготовленного песка и цемента отвешивают 10 порций песка по 2,86 кг и 10 порций цемента по 0,95 кг. Цемент и песок высыпают в предварительно протертую мокрой тканью сферическую чашу и перемешивают лопатой в течение 1 мин, температура помещения — по [5]. Три порции сухой цементно-песчаной смеси герметично упаковываются в полиэтиленовые пакеты, три в бумажные, а три помещаются в металлические емкости и откладываются на хранение. Три порции оставляют для исследования консистенции цементного раствора, с последующей корректировкой его состава и определения активности смеси до начала хранения.

### 3.4.2.3. Планирование эксперимента

В качестве фактора, влияющего на результаты эксперимента (активность цемента), берется только продолжительность хранения сухой цементно-песчаной смеси  $x_1$ . План проведения однофакторного эксперимента для трех вариантов хранения смеси приведен в табл. 20.

Таблица 20

План проведения эксперимента

Число опытов	Номер опыта	Вариант хранения	Продолжительность хранения	Активность цемента
			$X_1$	$Y_i$
12	1	Полиэтиленовая упаковка	20	
	2		40	
	3		60	
	4	Бумажная упаковка	20	
	5		40	
	6		60	

Число опытов	Номер опыта	Вариант хранения	Продолжительность хранения	Активность цемента
			$X_1$	$Y_i$
12	7	Металлическая емкость	20	
	8		40	
	9		60	
	10	Определение консистенции, корректировка состава, обеспечение оценки дисперсии воспроизводимости эксперимента	0	
	11		0	
	12		0	

#### **3.4.2.4. Определение консистенции цементного раствора**

Для каждой из оставленных порций определяется и в случае необходимости корректируется консистенция цементного раствора в соответствии с прил. 5.

#### **3.4.2.5. Методика проведения основного эксперимента**

Для проверки активности цемента, без хранения смеси, берут растворы, использованные при корректировке консистенции цементного теста. При проведении опытов с сухой смесью, выдержанной в течение запланированного срока, в порции смеси необходимо добавлять воду в соответствии с откорректированными по пункту 2.2.4 данными.

Изготовление образцов и их проверка на прочность выполняется аналогично пункту 3.3.2.5 (Лабораторная работа 1).

Результаты исследований заносятся в табл. П.2.1 (прил. 2).

### **3.5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУХОЙ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ СМЕСИ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ БЕТОНОВ НА СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКЕ**

#### **3.5.1. Содержание и основные характеристики работы**

**Цель работы.** Экспериментальное исследование технологии использования сухой цементно-песчаной смеси для приготовления бетонов на строительной площадке.

##### **Задачи, решаемые в ходе выполнения работы:**

описание параметров эксперимента (выделение контролируемых и неконтролируемых, управляемых и неуправляемых факторных переменных, результативных признаков);

выбор методов исследования;

составление плана эксперимента;

получение экспериментальных данных;

обработка экспериментальных данных методами математической статистики;

формирование основных выводов и предложений по результатам проведения исследований.

проведение исследований.

**Описание объекта исследования.** В данной лабораторной работе предлагается исследовать технологию использования сухой цементно-песчаной смеси для приготовления бетонов на строительной площадке.

Сухая цементно-песчаная смесь может использоваться на строительной площадке для приготовления строительного раствора, тяжелого и легкого бетона. В каждом из этих случаев методика подбора состава бетона и его приготовления, использования сухой цементно-песчаной смеси имеют существенные различия, которые предлагается выделить и исследовать самостоятельно.

**Выбор предмета и методов исследования.** Предлагается провести следующие исследования в рамках данной работы:

а) исследование технологии использования сухой цементно-песчаной смеси для приготовления тяжелого бетона;

б) исследование технологии использования сухой цементно-песчаной смеси для приготовления легкого бетона.

При исследовании технологии использования сухой цементно-песчаной смеси для приготовления бетонов в качестве управляемых переменных факторов выступает соотношение составляющих бетонной смеси (в случае приготовления легкого бетона в качестве управляемого фактора добавляется водонасыщенность керамзитового гравия), в качестве результативного признака выступает прочность бетона на сжатие. Для обеспечения чистоты эксперимента (исключения помех) необходимо выделить факторы, воздействующие на прочность бетона помимо выделенных управляемых факторов и обеспечить неизменность их воздействия для всех опытов. Такими факторами являются влажность компонентов смеси (кроме влажности керамзитового гравия, выступающего в качестве управляемого переменного фактора), консистенция раствора, технология изготовления и испытания образцов и т. д.

Подбор состава смеси выполняется по [15, 16, 17].

Для решения поставленной задачи рекомендуется использовать методы планирования факторных экспериментов с получением математической модели (регрессионной модели) технологии приготовления бетонов.

## **3.5.2. Указания к выполнению экспериментальной части**

### ***3.5.2.1. Приборы и материалы, необходимые для проведения работы***

Для проведения работы необходимы следующие приборы и материалы:

технические весы с разновесами РН-10Ц13У;

лопатка для перемешивания;

конус для определения пластичности смеси;

сферическая чашка;

встряхивающий столик;

штыковка;  
вибростол;  
мерный цилиндр;  
пикнометр емкостью 100 мл;  
эксикатор;  
объемометр — прибор Ле-Шателье;  
стальной цилиндр со съемным дном и плунжером;  
набор лабораторных сит;  
формы для приготовления образцов-кубов;  
сушильный шкаф;  
пресс для исследования образцов на сжатие МУП-20;

### **3.5.2.2. Расчет расхода материалов**

**Расчет состава тяжелого бетона.** Для проектирования состава тяжелого бетона необходимо иметь следующие данные:

заданную марку бетона;  
требуемую подвижность бетонной смеси, определяемую осадкой конуса ОК, см;  
активность цемента  $R_{ц}$ ;  
насыпную плотность щебня (гравия, песка);  
истинную плотность составляющих;  
пустотность щебня, гравия или песка  $V_{п. щ}$ , г;  
крупность зерен заполнителя;  
влажность заполнителей  $\omega_{п}$ ,  $\omega_{щ}$ ,  $\omega_{п}$ , г.

Характеристика исходных материалов определяется с использованием стандартных методик, изложенных в прил. 5.

**Проектирование номинального (лабораторного) состава тяжелого бетона.** Подбор состава тяжелого (обычного) бетона заключается в установлении наиболее рационального соотношения между составляющими бетон материалами (цементом, водой, песком, щебнем или гравием). Такое соотношение должно обеспечивать требуемую удобоукладываемость бетонной смеси для принятого способа ее уплотнения, а также набора бетоном заданной прочности в назначенный срок при наименьшем расходе цемента. В отдельных случаях вводят также требования о получении бетона необходимой плотности, морозостойкости, водонепроницаемости.

Состав бетона выражают расходом всех составляющих материалов по массе на  $1 \text{ м}^3$  уложенной и уплотненной бетонной смеси или отношением массы составляющих материалов смеси к массе цемента, принимаемой за единицу, т. е.  $1 : x : y$  (цемент : песок : щебень или гравий) при В/Ц = 2. Например, в первом случае состав бетона: цемента — 280, песка — 670, щебня — 1300, воды — 170 кг/м, а во втором случае:  $1 : 2,4 : 4,7$  при В/Ц = 0,6.

Различают два состава бетона: номинальный (лабораторный), рассчитанный для материалов в сухом состоянии, и производственный (полевой) — для материалов в естественно-влажном состоянии.

Для расчета состава тяжелого бетона имеется несколько методов, среди которых наиболее простым и удобным является метод расчета по абсолютным объемам. При этом методе предполагается, что свежеприготовленная бетонная смесь после укладки в форму или опалубку и уплотнения в ней не будет иметь пустот.

Состав бетона по методу абсолютных объемов подбирают в два этапа. Вначале рассчитывают ориентировочный состав бетона, затем расчет проверяют и уточняют по результатам пробных замесов и испытаний контрольных образцов.

Состав бетона для пробных замесов рассчитывают в следующей последовательности: вычисляют водоцементное отношение, расход воды, расход цемента, после чего определяют расход крупного и мелкого заполнителя на  $1 \text{ м}^3$  бетонной смеси.

Водоцементное отношение В/Ц вычисляют исходя из требуемой марки бетона, активности цемента и с учетом вида и качества составляющих по следующим формулам:

для бетонов с водоцементным отношением  $В/Ц \leq 0,4$

$$R_b = AR_c / (В/Ц - 0,5) \quad (61)$$

для бетонов с водоцементным отношением  $В/Ц \geq 0,4$

$$R_b = A_1 R_c / (В/Ц - 0,5), \quad (62)$$

где  $R_b$  — марка бетона, МПа;  $R_c$  — активность цемента, МПа;  $A$  и  $A_1$  — коэффициенты, учитывающие качество материалов (табл. 21).

Таблица 21

Значения коэффициентов  $A$  и  $A_1$

Характеристика заполнителей и цемента	$A$	$A_1$
Высококачественные	0,65	0,43
Рядовые	0,6	0,4
Пониженного качества	0,55	0,37

Примечание. К высококачественным материалам относят щебень из плотных горных пород высокой прочности, песок оптимальной крупности и портландцемент высокой активности без добавок или с минимальным количеством гидравлической добавки в его составе; заполнители должны быть чистые и фракционированные. К рядовым материалам относят заполнители среднего качества, в том числе гравий, портландцемент средней активности или высокомарочный шлакопортландцемент. К материалам пониженного качества относят крупные заполнители низкой прочности, мелкие пески, цементы низкой активности.

После преобразования относительно В/Ц приведенные выше формулы имеют следующий вид:

$$В/Ц = (AR_c) / (R_b + 0,5AR_c) \text{ или } В/Ц = (A_1R_c) / (R_b + 0,5A_1R_c). \quad (63)$$

Расход воды (водопотребность),  $\text{л}/\text{м}^3$ , ориентировочно определяют исходя из заданной удобоукладываемости бетонной смеси по табл. 21, которая составлена с учетом вида и крупности зерен заполнителя.

Расход цемента на 1 м<sup>3</sup> бетона вычисляют по уже известному водоцементному отношению и определенной по табл. 22 водопотребности бетонной смеси. Если расход на 1 м<sup>3</sup> бетона окажется меньше минимально допустимого (200...220 кг/м<sup>3</sup>), то из условия получения плотного бетона расход цемента увеличивают до требуемой нормы или вводят тонкомолотую добавку.

Таблица 22

### Водопотребность бетонной смеси

Удобоукладываемость бетонной смеси			Расход воды, кг/м <sup>3</sup> , при наибольшей крупности заполнителя, мм					
Осадка конуса, см	Жесткость, с		гравия			щебня		
	по ГОСТ 10181.1—81	по техническому вискозиметру	10	20	40	10	20	40
			0	31	120...90	150	135	125
0	30...20	80...60	160	145	130	170	155	145
0	20...11	50...30	165	150	135	175	160	150
0	10...5	15...30	175	160	145	185	170	155
1...2	—	—	185	170	155	195	180	165
3...4	—	—	195	180	165	205	190	175
5...6	—	—	200	185	170	210	195	180
7...8	—	—	205	190	175	215	200	185
9...10	—	—	215	200	185	225	210	195

Примечание. Данные таблицы справедливы для бетонной смеси на портландцементе и песке средней крупности. При использовании пуццоланового портландцемента расход воды увеличивается на 20 кг/м<sup>3</sup>; в случае применения мелкого песка взамен среднего расход воды также увеличивается на 10 кг, а при использовании крупного песка уменьшается на 10 кг.

Расход заполнителей (песка, щебня или гравия), кг/м<sup>3</sup>, бетона вычисляют исходя из двух условий:

1. Сумма абсолютных объемов всех компонентов бетона равна 1 м<sup>3</sup> уплотненной бетонной смеси, т. е.

$$Ц / \rho_{ц} + В / \rho_{в} + П / \rho_{п} + Щ (Г) / \rho_{щ(г)} = 1, \quad (64)$$

где Ц, В, П, Щ (Г) — расход цемента, воды, песка и щебня (гравия) соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{ц}$ ,  $\rho_{в}$ ,  $\rho_{п}$ ,  $\rho_{щ(г)}$  — истинная плотность этих материалов, кг/м<sup>3</sup>;  $Ц / \rho$ ,  $В / \rho_{в}$ ,  $П / \rho_{п}$ ,  $Щ (Г) / \rho_{щ(г)}$  — абсолютные объемы материалов, м<sup>3</sup>.

2. Цементно-песчаный раствор заполнит пустоты в крупном заполнителе с некоторой раздвижкой зерен, т. е.

$$Ц / \rho_{ц} + В / \rho_{в} + П / \rho_{п} = V_{п. щ(г)} \left( Щ(Г) / \rho_{н.щ(г)} \right) \alpha, \quad (65)$$

где  $V_{п. щ(г)}$  — пустотность щебня (гравия) в рыхлом состоянии;  $\rho_{н. щ(г)}$  — насыпная плотность щебня (гравия), кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha$  — коэффициент раздвижки зерен щебня (гравия), принимают в зависимости от расхода цемента и водоцементного отношения (для пластичных смесей определяется по табл. 23, для жестких — 1,05...1,2).

Решая совместно эти два уравнения, находят формулу для определения расхода щебня (гравия) бетона, кг/м<sup>3</sup>:

$$Щ (Г) = 1 / [(V_{п. щ(г)} \alpha) / (\rho_{н. щ(г)}) + 1 / \rho_{щ(г)}]. \quad (66)$$

Значения коэффициента  $\alpha$  для пластичных бетонных смесей

Расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент $\alpha$ при В/Ц				
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	—	—	1,26	1,32	1,38
300	—	1,3	1,36	1,42	—
350	1,32	1,38	1,44	—	—
400	1,4	1,46	—	—	—

Примечание. При других значениях Ц и В/Ц коэффициент  $\alpha$  находят интерполяцией.

После определения расхода щебня (гравия) рассчитывают расход песка, кг/м<sup>3</sup>, как разность между проектным объемом бетонной смеси и суммой абсолютных объемов цемента, воды и крупного заполнителя по формуле

$$\Pi = \left[ 1 - \frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{Щ(\Gamma)}{\rho_{щ(\Gamma)}} \right] \rho_{п}. \quad (67)$$

Полученный расход составляющих смеси выражается в виде отношения их к массе цемента, принимаемого за единицу.

**Расчет производственного (полевого) состава бетона.** Для проектирования полевого состава бетона необходимо учесть естественную влажность материалов (песка и щебня). Так как значения влажностей в процентах от массы получены экспериментальным путем, то остается только откорректировать состав.

Потребность в воде уменьшается на значение содержания воды в песке и щебне (гравии):

$$В_{\Pi} = В_{н} - \frac{\Pi_{н} \omega_{п} + Щ(\Gamma)_{н} \omega_{щ(\Gamma)}}{100}. \quad (68)$$

Расход песка увеличится на величину содержания воды в песке и составит

$$\Pi_{п} = \Pi_{н} + \frac{\Pi_{н} \omega_{п}}{100}. \quad (69)$$

Расход щебня (гравия) составит

$$Щ_{п} = Щ(\Gamma)_{н} + \frac{Щ(\Gamma)_{н} \omega_{щ(\Gamma)}}{100}. \quad (70)$$

В результате получаем производственную формулу состава цементного раствора:

$$В_{\Pi} : Ц_{п} : \Pi_{п} : Щ(\Gamma)_{п}, \quad (71)$$

где  $Ц_{п} = 1$ .

Эта формула берется в качестве базовой для проведения экспериментального этапа исследований. В формулах индекс «н» указывает на то, что это расход составляющих для номинального состава бетона; индекс «п» указывает на то, что это расход составляющих для производственного состава бетона.

**Расчет расхода материалов на проведение эксперимента.** Определение марки бетона осуществляется путем испытания образцов-кубов на прочность при сжатии. На каждый опыт готовятся по три образца. Принимается значение средней плотности бетона  $2300 \text{ кг/м}^3$ . Объем одного образца  $0,15 \text{ м} \times 0,15 \text{ м} \times 0,15 \text{ м} = 0,003375 \text{ м}^3$ . Расход раствора на один опыт равен  $2300 \text{ кг/м}^3 \times 0,003375 \text{ м}^3 \times 3 = 23,3 \text{ кг}$ . С запасом примем расход раствора на один опыт 25 кг.

**Расчет состава легкого бетона на пористом заполнителе.** Для проектирования состава легкого бетона на пористом заполнителе необходимо иметь следующие данные: вид и активность цемента (для приготовления керамзитобетона используется цемент марки 300, 400, 500), заданную марку керамзитобетона и его среднюю плотность в высушенном состоянии, марку керамзита, насыпную и истинную плотности составляющих, крупность зерен и влажность заполнителей. Характеристики составляющих смеси определяются по методикам, изложенным в прил. 5.

Марка керамзитобетона и средняя плотность бетона в сухом состоянии назначается исследователем самостоятельно или заказчиком исследований.

**Проектирование номинального (лабораторного) состава керамзитобетона.** Назначается ориентировочный расход цемента в зависимости от требуемой прочности легкого бетона, марки керамзита и средней плотности керамзитобетона в соответствии с рекомендациями табл. 24.

Таблица 24

**Ориентировочный расход цемента (марки 400) для керамзитобетона  
плотного строения различных классов**

Марка керамзита	Расход цемента, $\text{кг/м}^3$ , керамзитобетона класса								
	B3,5	B5	B7,5	B10		B15		B22,5	
350...400	$\frac{220}{950}$	$\frac{230}{950}$	$\frac{270}{1100}$	—	—	—	—	—	—
450...500	$\frac{210}{1050}$	$\frac{220}{1050}$	$\frac{250}{1100}$	$\frac{270}{1700}$	$\frac{300}{1400}$	$\frac{340}{1800}$	$\frac{400}{1500}$	—	—
550...600	$\frac{200}{1150}$	$\frac{210}{1150}$	$\frac{230}{1200}$	$\frac{250}{1800}$	$\frac{280}{1400}$	$\frac{320}{1800}$	$\frac{380}{1500}$	$\frac{470}{1800}$	$\frac{500}{1700}$
700	—	$\frac{200}{1250}$	$\frac{220}{1250}$	$\frac{240}{1800}$	$\frac{270}{1400}$	$\frac{310}{1800}$	$\frac{360}{1500}$	$\frac{440}{1800}$	$\frac{470}{1700}$
800	—	—	—	$\frac{230}{1800}$	$\frac{250}{1500}$	$\frac{300}{1800}$	$\frac{340}{1500}$	$\frac{480}{1800}$	$\frac{460}{1600}$

**Примечание.** Предварительно определяется класс исходя из заданной прочности керамзитобетона, а также марка керамзита по насыпной плотности применяемого для приготовления легкого бетона и соответствует ли его прочность при сдавливании в цилиндре этой марке. Над чертой — расход цемента; под чертой — средняя плотность бетона в высушенном состоянии. При использовании цемента марки 300 норма его расхода для бетонов класса B3,5; B5; B7,5; B10; B15 повышается на 5, 7, 10, 15 и 20 % соответственно. При использовании цемента марки 500 его расход понижается для бетонов класса B7,5; B15; B20; B22,5 на 10, 12, 14, 16 % соответственно. При повышении подвижности бетонной смеси до 2, 5 и 8 см расход цемента повышается на 7, 15, 20 % соответственно, а при повышении жесткости смеси до 40...60 с расход цемента снижается на 10 %.

Назначается ориентировочный расход воды в соответствии с заданным показателем подвижности или жесткости смеси по табл. 25 в зависимости от вида песка и насыпной плотности керамзитового гравия.

Таблица 25

**Ориентировочный расход воды на приготовление керамзитобетонной смеси  
плотного строения**

Показатель удобоукладываемости смеси		Расход воды, л/м <sup>3</sup> , керамзитобетона на песке				
		кварцевом			керамзитовом	
Осадка конуса, см	Жесткость, с, по ГОСТ 10181—81	при насыпной плотности керамзитового гравия				
		300	500	800	300	500
—	22...22,5	175...190	165...180	155...170	210...225	200...215
—	15...20	185...200	175...190	165...180	225...240	215...235
—	7...13	195...210	185...200	175...190	250...270	240...260
—	4...7	205...220	195...210	185...200	275...290	265...290
3...5	—	215...230	205...220	195...210	300...325	290...315
6...8	—	225...240	215...230	205...220	325...350	315...340
9...12	—	235...250	225...240	215...230	350...375	340...360

Рассчитывается ориентировочный расход крупного и мелкого заполнителя, кг/м<sup>3</sup>, бетонной смеси исходя из заданной средней плотности бетона в сухом состоянии по формуле

$$З = \rho_b - 1,15Ц, \quad (72)$$

где  $\rho_b$  — заданная плотность сухого бетона, кг/м<sup>3</sup>; 1,15Ц — масса цементного камня в бетоне с учетом химически связанной гидратной воды в нем, кг.

Затем определяют расход гравия и песка по массе, кг/м<sup>3</sup>:

$$\Pi = \frac{Зr\rho_{п}}{r\rho_{п} + (1-r)\rho_{г}}, \quad (73)$$

где  $\rho_{п}$  и  $\rho_{г}$  — насыпная плотность соответственно фракционированного песка и гравия;  $r$  — доля песка в смеси заполнителей (выбирают по данным табл. 26, суммируя зерновой состав фракций до 5 мм).

Таблица 26

**Ориентировочные зерновые составы смеси фракционированных заполнителей  
для легкого бетона на керамзитовом гравии**

Размер зерна, мм	Зерновой состав заполнителей, % от суммы объемов отдельных фракций смеси для бетона				
	конструктивно-теплоизоляционного			конструкционного	
	При наибольшей крупности зерен, мм				
	10	20	40	10	20
До 1,25	25	20	15	25	20
1,25...2,5	15	15	10	20	15
2,5...5	10	10	10	10	15
5...10	50	25	15	45	20
10...20	—	30	20	—	30
20...40	—	—	30	—	—

Примечание. При переходе от гравия к щебню содержание песчаных фракций увеличивается на 5...7 % и, следовательно, уменьшается содержание фракций крупного заполнителя.

Расход гравия, кг, равен

$$\Gamma = 3 - \Pi.$$

Ориентировочный расход крупного заполнителя для конструкционно-теплоизоляционных бетонов в объемном исчислении может быть равен примерно  $0,90 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^3$  бетона. Для конструкционного керамзитобетона этот расход может быть определен в зависимости от марки керамзита (по насыпной плотности) и класса керамзитобетона по табл. 27.

Зная общий расход песка и гравия, можно рассчитать их расход по отдельным фракциям, пользуясь рекомендациями оптимальных зерновых составов смеси заполнителей в соответствии с табл. 25. Для расчета расхода каждой фракции заполнителей по массе вначале необходимо определить соотношение фракций по массе. Для этого умножают объемные доли соотношений фракций заполнителей из табл. 25 на значение соответствующей насыпной плотности каждой фракции, определенную до начала расчета. Затем рассчитывают расход каждой фракции заполнителей на  $1 \text{ м}^3$  бетонной смеси по массе (кг) исходя из найденных ранее расходов песка и гравия по соответствующим формулам.

Таблица 27

**Ориентировочный расход керамзитового гравия для конструкционного керамзитобетона**

Класс керамзитобетона	Марка керамзитового гравия	Расход керамзита, $\text{м}^3$ на $\text{м}^3$ бетона, при плотности керамзитобетона, $\text{кг}/\text{м}^3$				
		1400	1500	1600	1700	1800
B10	400	0,70	0,64	0,54	—	—
	500	0,74	0,67	0,57	—	—
	600	0,80	0,74	0,67	0,56	—
	700	0,84	0,77	0,70	0,60	—
B15	500	0,77	0,70	0,58	0,50	—
	600	0,83	0,77	0,68	0,58	—
	700	0,85	0,80	0,72	0,60	0,50
	800	0,88	0,83	0,75	0,67	0,53
B20	500	—	0,71	0,59	0,57	—
	600	0,84	0,78	0,69	0,59	0,50
	700	0,86	0,82	0,73	0,62	0,52
	800	0,89	0,84	0,77	0,68	0,54
B22,5	600	—	0,80	0,70	0,60	0,50
	700	—	0,84	0,75	0,67	0,53
	800	—	0,86	0,80	0,70	0,56

**Расчет производственного (полевого) состава керамзитобетона.** Проектирование полевого состава керамзитобетона производится аналогично полемому составу тяжелого бетона.

Потребность в воде уменьшается на значение содержания воды в песке и керамзите:

$$B_{\Pi} = B_{\text{H}} - \frac{\Pi_{\text{H}} \omega_{\Pi} + K_{\text{H}} \omega_{\text{K}}}{100}. \quad (74)$$

Расход песка увеличится на величину содержания воды в песке и составит

$$\Pi_n = \Pi_n + \frac{\Pi_n \omega_n}{100}. \quad (75)$$

Расход керамзита составит

$$K_n = K_n + \frac{K_n \omega_k}{100}. \quad (76)$$

В результате получаем производственную формулу состава цементного раствора:

$$B_n : Ц_n : \Pi_n : K_n, \quad (77)$$

где  $Ц_n = 1$ .

Эта формула берется в качестве основополагающей для проведения экспериментального этапа исследований. В формулах индекс «н» указывает на то, что это расход составляющих для номинального состава бетона; индекс «п» указывает на то, что это расход составляющих для производственного состава бетона.

**Расчет расхода материалов на проведение эксперимента.** Определение марки бетона осуществляется путем испытания образцов-кубов на прочность при сжатии. На каждый опыт готовится три образца. Принимается значение средней плотности бетона  $2300 \text{ кг/м}^3$ . Объем одного образца  $0,15 \text{ м} \times 0,15 \text{ м} \times 0,15 \text{ м} = 0,003375 \text{ м}^3$ . Расход раствора на один опыт равен  $2300 \text{ кг/м}^3 \times 0,003375 \text{ м}^3 \times 3 = 23,3 \text{ кг}$ . С запасом примем расход раствора на один опыт  $25 \text{ кг}$ .

### 3.5.2.3. Планирование эксперимента

Проводятся два факторных эксперимента — для тяжелого бетона и легкого бетона на керамзите. В качестве факторов, влияющих на результаты эксперимента (прочность бетона), берутся: водоцементное отношение  $B/Ц$   $x_1$ , отношение мелкого заполнителя (песка) и цемента  $x_2$  и отношение крупного заполнителя и цемента  $З/Ц$   $x_3$ .

В работе применяется факторный эксперимент.

Планирование осуществляется на трех уровнях — верхнем (+1), основном (0) и нижнем (−1). Верхний и нижний отстоят от основного на одинаковую величину, называемую интервалом варьирования. Значения факторов сводятся в табл. 28.

Таблица 28

Основные характеристики плана эксперимента

Характеристика	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Основной уровень	$X_{0,1}$	$X_{0,2}$	$X_{0,3}$
Интервал варьирования	$\Delta X_1$	$\Delta X_2$	$\Delta X_3$
Верхний уровень	$X_{1 \max} = X_{0,1} + \Delta X_1$	$X_{2 \max} = X_{0,2} + \Delta X_2$	$X_{3 \max} = X_{0,3} + \Delta X_3$
Нижний уровень	$X_{1 \min} = X_{0,1} - \Delta X_1$	$X_{2 \min} = X_{0,2} - \Delta X_2$	$X_{3 \min} = X_{0,3} - \Delta X_3$

При использовании полного факторного эксперимента, т. е. при трех уровнях исследования каждого фактора, необходимо в общей сложности провести 29 опытов (27 с учетом перебора всех возможных взаимодействий факторных признаков и дополнительно два опыта на основном уровне варьирования факторных признаков для определения дисперсии воспроизводимости эксперимента по трем параллельным опытам на основном уровне исследования факторов). Это является достаточно трудоемкой работой, поэтому представляется возможным применение сокращенного плана проведения эксперимента (табл. 29). Для этого в плане проведения эксперимента перебор факторных признаков осуществляется на верхнем и нижнем уровне и дополнительно вводятся три опыта на основном уровне варьирования для подсчета дисперсии воспроизводимости, а также для наглядного изображения результатов эксперимента по трем точкам (значениям результативного признака для факторных признаков, установленных на нижнем, основном и верхнем уровне исследования факторов), что дало бы возможность без предварительного перебора определить тип регрессионной зависимости между факторными признаками и результативным.

Таблица 29

**Сокращенный факторный план проведения эксперимента**

Число опытов	Номер опыта	Матрица планирования			Свойства
		$X_1$	$X_2$	$X_3$	
1	2	3	4	5	9
N	1	+1	+1	+1	
	2	+1	+1	-1	
	3	+1	-1	+1	
	4	+1	-1	-1	
	5	-1	+1	+1	
	6	-1	+1	-1	
	7	-1	-1	+1	
	8	-1	-1	-1	
	9.1	0	0	0	
	9.2	0	0	0	
	9.3	0	0	0	

#### **3.5.2.4. Методика проведения основного эксперимента**

**Расчет расхода составляющих смеси.** Расход материалов для каждого опыта, с учетом потребности в смеси (25 кг), определяется следующим образом:

$$Ц = \frac{25}{Ц + П + З + В};$$

$$П = \frac{25}{Ц + П + З + В} П;$$

$$З = \frac{25}{Ц + П + З + В} З;$$

$$В = \frac{25}{Ц + П + З + В} В,$$

где Ц, П, З, В — расход на один опыт цемента, песка, крупного заполнителя и воды соответственно; Ц + П + З + В — соотношения составляющих смеси к единице расхода цемента.

Расчет ведется исходя из того, что  $\frac{В}{Ц} = x_1$ ,  $\frac{П}{Ц} = x_2$ ,  $\frac{З}{Ц} = x_3$ , а так как значение расхода цемента принято за единицу (Ц = 1), то в соответствии с планом проведения эксперимента:

$$В = x_1; П = x_2; Ц = x_3.$$

Расход материала для каждого опыта вносится в табл. 30.

Таблица 30

**Расход составляющих смеси в соответствии с планом проведения эксперимента для каждого опыта**

Номер опыта	Матрица планирования			Расход материалов			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Цемент	Вода	Песок	Крупный заполнитель
1	+1	+1	+1				
2	+1	+1	-1				
3	+1	-1	+1				
4	+1	-1	-1				
5	-1	+1	+1				
6	-1	+1	-1				
7	-1	-1	+1				
8	-1	-1	-1				
9	0	0	0				

**Отвешивание компонентов смеси.** Расход материалов для каждого опыта берется из табл. 28. Песок следует просеять через сито с ячейкой  $\varnothing$  2 мм. Цемент просеивается через сито  $\varnothing$  1,25 мм в количестве, необходимом для проведения опытов, запланированных на данный день исследований (исключается использование остатков для последующих опытов).

Мешок с цементом после работ герметично упаковывается (во избежание колебаний влажности цемента).

**Приготовление смеси.** Цемент перемешивают с песком в течении 1 мин, далее делают в смеси лунку и заливают необходимое количество воды, дают воде впитаться в течение 0,5 мин и тщательно перемешивают смесь до обретения однородности.

**Подготовка форм.** Элементы очищаются от налипшего цементного камня; собираются формы, плотно подгоняются между собой, чтобы исключить возможность деформации образцов в дальнейшем. Внутренние грани формы необходимо смазать маслом.

**Изготовление образцов.** Перед изготовлением образцов внутреннюю поверхность стенок форм и поддона слегка смазывают машинным маслом. Стыки наружных стенок друг с другом и с поддоном формы промазывают тонким слоем солидола или другой густой смазки.

Для уплотнения раствора форму жестко закрепляют в центре виброплощадки. Допускается устанавливать две формы, симметрично расположенные относительно центра виброплощадки.

Форму по высоте наполняют приблизительно на 1 см раствором и включают вибрационную площадку. В течение первых 2 мин вибрации все три гнезда формы равномерно небольшими порциями заполняются раствором. По истечении 3 мин от начала вибрации виброплощадку отключают.

Форму снимают с виброплощадки, срезают ножом, смоченным водой, излишек раствора, заглаживают поверхность образцов вровень с краями формы и маркируют их.

После изготовления образцы в формах хранят  $(24 \pm 2)$  ч в ванне с гидравлическим затвором.

По истечении времени хранения образцы осторожно расформовывают и укладывают в ванны с питьевой водой в горизонтальном положении так, чтобы они не соприкасались друг с другом.

Вода должна покрывать образцы не менее чем на 2 см. Воду меняют каждые 14 сут. Температура ее при замене должна быть  $(20 \pm 2)$  °С, как и при хранении образцов.

По истечении срока хранения образцы вынимают из воды и не позднее чем через 30 мин подвергают испытанию. Непосредственно перед испытанием образцы должны быть насухо вытерты.

**Определение предельной прочности на сжатие** производится на прессе МУП-20, в соответствии с рекомендациями прил. 5.

Достигнутое в процессе испытания максимальное усилие принимают за величину разрушающей нагрузки  $P$  и вычисляют как произведение числа делений по шкале силоизмерителя на тарировочный коэффициент, который приводится в паспорте прессы или в акте о проведенной тарировке его шкалы.

Рабочую площадь сечения каждого образца определяют как среднее арифметическое значение площадей двух противоположных граней.

Прочность бетона на сжатие  $R_{сж}$ , кгс/см<sup>2</sup>, вычисляют для каждого образца по формуле

$$R_{сж} = \frac{P}{F} \alpha, \quad (78)$$

где  $P$  — разрушающая нагрузка, кгс;  $F$  — средняя площадь рабочего сечения, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  — поправочный коэффициент, зависящий от длины ребра куба.

При испытаниях кубов с длиной ребер 70, 100, 200, 300 мм в формулу вводится коэффициент  $\alpha$ , значения которого приведены в табл. 31.

**Значения поправочного коэффициента  $\alpha$** 

Форма и размер образцов, мм	Минимальное значение коэффициента $\alpha$
Кубы с ребром:	
70	0,85
100	0,95
150	1
200	1,05
300	1,1

Результаты исследований заносятся в табл. П.2.2. прил. 2.

## Список использованной литературы

1. Математический энциклопедический словарь / Гл. ред. Ю. В. Прохоров ; ред. кол. С. И. Адян, Н. С. Бахвалов, В. И. Бютицков, А. П. Ершов, Л. Д. Кудрявцев, А. Л. Онищик, А. П. Юшкевич. — М. : Советская энциклопедия, 1988. — 847 с.
2. Статистические методы в инженерных исследованиях (лабораторный практикум) : учеб. пособие / В. П. Бородюк, А. П. Вошинин, А. З. Иванов и др. ; под ред. Г. К. Круга. — М. : Высшая школа, 1983. — 216 с.
3. ГОСТ 25328—82. Цементы для строительных растворов. Технические условия. — М. : ИПК «Издательство стандартов», 2004. — 4 с.
4. ГОСТ 310.2—92 (СТ СЭВ 3920—82). Цементы. Методы определения тонкости помола. — М. : Изд-во стандартов, 1992. — 4 с.
5. ГОСТ 310.1—2003 (СТ СЭВ 3920—82). Цементы. Методы испытаний. Общие положения. — М. : Издательство стандартов, 2003. — 2 с.
6. ГОСТ 310.4—81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. — М. : Издательство стандартов, 1992. — 12 с.
7. ГОСТ 28013—98. Растворы строительные. Общие технические условия. — М. : МНТКС, 1998. — 8 с.
8. ГОСТ 27006—86. Бетоны. Правила подборки состава. — М. : Госстандарт, 1989. — 7 с.
9. ГОСТ 10180—90. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. — М. : Госстандарт СССР, 1991. — 4 с.
10. Математическая теория планирования эксперимента / Под ред. С. М. Ермакова. — М. : Наука, 1983. — 392 с.
11. Статистические методы в инженерных исследованиях (лабораторный практикум) : учеб. пособие / В. П. Бородюк, А. П. Вошинин, А. З. Иванов, Г. К. Круг. — М. : Высшая школа, 1983. — 216 с.
12. ГОСТ 8735—88. Песок для строительных работ. Методы испытаний. — М. : Госстандарт СССР, 1989. — 22 с.
13. ГОСТ 9758—86. Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний. — М. : Стандартиформ, 2014. — 62 с.
14. ГОСТ 10181—2000. Смеси бетонные. Методы испытаний. — М. : МНТКС, 2000. — 20 с.
15. ГОСТ 8269—87. Щебень из природного камня, гравий и щебень из гравия для строительных работ. Методы испытаний. — М. : Госстандарт СССР, 1987. — 84 с.

## Список рекомендованной литературы

1. Бутт, Ю. М. Практикум по химической технологии вяжущих материалов / Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев — М. : Высшая школа, 1973. — 503 с.
2. Венюа, М. Цементы и бетоны в строительстве / М. Венюа ; под ред. Б. А. Крылова ; пер. с фр. — М. : Стройиздат, 1980. — 415 с.

3. *Волконский, Б. В.* Технологические, физико-механические исследования цементных материалов / Б. В. Волконский, С. Д. Макашев, Н. П. Штейерт. — М. : Стройиздат, 1972. — 301 с.
4. *Кузнецова, Т. В.* Физическая химия вяжущих материалов / Т. В. Кузнецова, И. В. Кудряшов, В. В. Тимашев — М. : Высшая школа, 1989. — 384 с.
5. *Ларионова, З. М.* Фазовый состав, микроструктура и прочность цементного камня и бетона / З. М. Ларионова. — М. : Стройиздат, 1994. — 262 с.
6. Математическая теория планирования эксперимента / Под ред. С. М. Ермакова. — М. : Наука, 1983. — 392 с.
7. *Совалов, И. Г.* Методы активации цементов и влияние активации на свойства бетонов / И. Г. Совалов, Ю. Г. Хаютин. — М. : Госстройиздат, 1963. — 41 с.
8. *Финни, Д.* Введение в теорию планирования эксперимента / Д. Финни ; под ред. Ю. В. Линника ; пер. с англ. — М. : Наука, 1970. — 287 с.

**ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет  
Институт архитектуры и строительства  
Строительный факультет  
Кафедра технологии строительного производства

Лабораторная работа № 1  
«Экспериментальное определение технологических режимов  
для улучшения свойств цемента»  
по дисциплине:  
«Современные технологии строительства из монолитного бетона и железобетона»

Выполнил :  
магистр гр. МАГ-1-2005  
Иванов И. И.  
Проверил:  
преп. каф. ТСП  
Сидоров А. А.

Волгоград, 2015

## Приложение 2

### ТАБЛИЦЫ ДЛЯ ЗАНЕСЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Таблица П.2.1

Таблица для занесения результатов проведения опытов по л/р 1, 2

Номер опыта	Дата активизации	Дата изготовления образцов	Пластичность смеси	Дата испытания на прочность	Шифр образца	Испытание на прочность					
						Изгиб	Сжатие			Средняя прочность	
							Предельная прочность	Разрушающая нагрузка	Предельная прочность	7-дневная	28-дневная
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		

Таблица П.2.2

Таблица для занесения результатов проведения опытов по л/р 3

Номер опыта	Дата изготовления образцов	Пластичность смеси	Дата испытания на прочность	Шифр образца	Испытания прочности на сжатие			
					Разрушающая нагрузка	Предельная прочность	Средняя прочность	
							7-дневная	28 дневная
1				1.1				
				1.2				
				1.3				
2				2.1				
				2.2				
				2.3				
3				3.1				
				3.2				
				3.3				
n				n.1				
				n.2				
				n.3				

## Приложение 3

### МАТРИЦЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Таблица П.3.1

**План полного факторного эксперимента типа  $3^2$**

Число опытов	№ опыта	Матрица планирования		Результативные признаки
		$X_1$	$X_2$	
11	1	+1	+1	$y_1$
	2	+1	0	$y_2$
	3	+1	-1	$y_3$
	4	0	+1	$y_4$
	5.1	0	0	$y_{5.1}$
	5.2	0	0	$y_{5.2}$
	5.3	0	0	$y_{5.3}$
	6	0	-1	$y_6$
	7	+1	+1	$y_7$
8	+1	0	$y_8$	
9	+1	-1	$y_9$	

Таблица П.3.2

**План полного факторного эксперимента типа  $3^3$**

Число опытов	Номер опыта	Матрица планирования			Результативные признаки
		$X_1$	$X_2$	$X_3$	
29	1	+1	+1	+1	$y_1$
	2	+1	+1	0	$y_2$
	3	+1	+1	-1	$y_3$
	4	+1	0	+1	$y_4$
	5	+1	0	0	$y_5$
	6	+1	0	-1	$y_6$
	7	+1	-1	+1	$y_7$
	8	+1	-1	0	$y_8$
	9	+1	-1	-1	$y_9$
	10	0	+1	+1	$y_{10}$
	11	0	+1	0	$y_{11}$
	12	0	+1	-1	$y_{12}$
	13	0	0	+1	$y_{13}$
	14.1	0	0	0	$y_{14.1}$
	14.2	0	0	0	$y_{14.2}$
	14.3	0	0	0	$y_{14.3}$
	15	0	0	-1	$y_{15}$
	16	0	-1	+1	$y_{16}$
	17	0	-1	0	$y_{17}$
	18	0	-1	-1	$y_{18}$
	19	-1	+1	+1	$y_{19}$
	20	-1	+1	0	$y_{20}$
	21	-1	+1	-1	$y_{21}$
	22	-1	0	+1	$y_{22}$
	23	-1	0	0	$y_{23}$
	24	-1	0	-1	$y_{24}$
	25	-1	-1	+1	$y_{25}$
26	-1	-1	0	$y_{26}$	
27	-1	-1	-1	$y_{27}$	

План полного факторного эксперимента типа  $3^4$ 

Число опытов	Номер опыта	Матрица планирования				Результативные признаки
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$y_i$
	1	-1	-1	-1	-1	$y_1$
	2	-1	-1	-1	0	$y_2$
	3	-1	-1	-1	+1	$y_3$
	4	-1	-1	0	-1	$y_4$
	5	-1	-1	0	0	$y_5$
	6	-1	-1	0	+1	$y_6$
	7	-1	-1	+1	-1	$y_7$
	8	-1	-1	+1	0	$y_8$
	9	-1	-1	+1	+1	$y_9$
	10	-1	0	-1	-1	$y_{10}$
	11	-1	0	-1	0	$y_{11}$
	12	-1	0	-1	+1	$y_{12}$
	13	-1	0	0	-1	$y_{13}$
	14	-1	0	0	0	$y_{14}$
	15	-1	0	0	+1	$y_{15}$
	16	-1	0	+1	-1	$y_{16}$
	17	-1	0	+1	0	$y_{17}$
	18	-1	0	+1	+1	$y_{18}$
	19	-1	+1	-1	-1	$y_{19}$
	20	-1	+1	-1	0	$y_{20}$
	21	-1	+1	-1	+1	$y_{21}$
	22	-1	+1	0	-1	$y_{22}$
	23	-1	+1	0	0	$y_{23}$
	24	-1	+1	0	+1	$y_{24}$
	25	-1	+1	+1	-1	$y_{25}$
	26	-1	+1	+1	0	$y_{26}$
	27	-1	+1	+1	+1	$y_{27}$
	28	0	-1	-1	-1	$y_{28}$
	29	0	-1	-1	0	$y_{29}$
	30	0	-1	-1	+1	$y_{30}$
	31	0	-1	0	-1	$y_{31}$
	32	0	-1	0	0	$y_{32}$
	33	0	-1	0	+1	$y_{33}$
	34	0	-1	+1	-1	$y_{34}$
	35	0	-1	+1	0	$y_{35}$
	36	0	-1	+1	+1	$y_{36}$
	37	0	0	-1	-1	$y_{37}$
	38	0	0	-1	0	$y_{38}$
	39	0	0	-1	+1	$y_{39}$
	40	0	0	0	-1	$y_{40}$
	41.1	0	0	0	0	$y_{41.1}$
	41.2	0	0	0	0	$y_{41.2}$
	41.3	0	0	0	0	$y_{41.3}$
	42	0	0	0	+1	$y_{42}$
	43	0	0	+1	-1	$y_{43}$
	44	0	0	+1	0	$y_{44}$
	45	0	0	+1	+1	$y_{45}$
	46	0	+1	-1	-1	$y_{46}$
	47	0	+1	-1	0	$y_{47}$

Число опытов	Номер опыта	Матрица планирования				Результативные признаки
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$y_i$
83	48	0	+1	-1	+1	$y_{48}$
	49	0	+1	0	-1	$y_{49}$
	50	0	+1	0	0	$y_{50}$
	51	0	+1	0	+1	$y_{51}$
	52	0	+1	+1	-1	$y_{52}$
	53	0	+1	+1	0	$y_{53}$
	54	0	+1	+1	+1	$y_{54}$
	55	+1	-1	-1	-1	$y_{55}$
	56	+1	-1	-1	0	$y_{56}$
	57	+1	-1	-1	+1	$y_{57}$
	58	+1	-1	0	-1	$y_{58}$
	59	+1	-1	0	0	$y_{59}$
	60	+1	-1	0	+1	$y_{60}$
	61	+1	-1	+1	-1	$y_{61}$
	62	+1	-1	+1	0	$y_{62}$
	63	+1	-1	+1	+1	$y_{63}$
	64	+1	0	-1	-1	$y_{64}$
	65	+1	0	-1	0	$y_{65}$
	66	+1	0	-1	+1	$y_{66}$
	67	+1	0	0	-1	$y_{67}$
	68	+1	0	0	0	$y_{68}$
	69	+1	0	0	+1	$y_{69}$
	70	+1	0	+1	-1	$y_{70}$
	71	+1	0	+1	0	$y_{71}$
	72	+1	0	+1	+1	$y_{72}$
	73	+1	+1	-1	-1	$y_{73}$
	74	+1	+1	-1	0	$y_{74}$
	75	+1	+1	-1	+1	$y_{75}$
	76	+1	+1	0	-1	$y_{76}$
	77	+1	+1	0	0	$y_{77}$
	78	+1	+1	0	+1	$y_{78}$
	79	+1	+1	+1	-1	$y_{79}$
	80	+1	+1	+1	0	$y_{80}$
	81	+1	+1	+1	+1	$y_{81}$

Таблица П.3.4

План сокращенного факторного эксперимента типа  $2^2$ 

Число опытов	Номер опыта	Матрица планирования		Результативные признаки
		$x_1$	$x_2$	$y_i$
7	1	-1	+1	$y_1$
	2	-1	-1	$y_2$
	3	+1	+1	$y_3$
	4	+1	-1	$y_4$
	5.1	0	+1	$y_{5.1}$
	5.2	0	-1	$y_{5.2}$
	5.3	0	+1	$y_{5.3}$

Таблица П.3.5

План сокращенного факторного эксперимента типа  $2^3$ 

Число опытов	Номер опыта	Матрица планирования			Результативные признаки
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_i$
11	1	-1	-1	-1	$y_1$
	2	-1	-1	+1	$y_2$
	3	-1	+1	-1	$y_3$
	4	-1	+1	+1	$y_4$
	5	+1	-1	-1	$y_5$
	6	+1	-1	+1	$y_6$
	7	+1	+1	-1	$y_7$
	8	+1	+1	+1	$y_8$
	9.1	0	0	0	$y_{9.1}$
	9.2	0	0	0	$y_{9.2}$
	9.3	0	0	0	$y_{9.3}$

Таблица П.3.6

План сокращенного факторного эксперимента типа  $2^4$ 

Число опытов	Номер опыта	Матрица планирования				Результативные признаки
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$y_i$
19	1	-1	-1	-1	-1	$y_1$
	2	-1	-1	-1	+1	$y_2$
	3	-1	-1	+1	-1	$y_3$
	4	-1	-1	+1	+1	$y_4$
	5	-1	+1	-1	-1	$y_5$
	6	-1	+1	-1	+1	$y_6$
	7	-1	+1	+1	-1	$y_7$
	8	-1	+1	+1	+1	$y_8$
	9	+1	-1	-1	-1	$y_9$
	10	+1	-1	-1	+1	$y_{10}$
	11	+1	-1	+1	-1	$y_{11}$
	12	+1	-1	+1	+1	$y_{12}$
	13	+1	+1	-1	-1	$y_{13}$
	14	+1	+1	-1	+1	$y_{14}$
	15	+1	+1	+1	-1	$y_{15}$
	16	+1	+1	+1	+1	$y_{16}$
	17.1	0	0	0	0	$y_{17.1}$
17.2	0	0	0	0	$y_{17.2}$	
17.3	0	0	0	0	$y_{17.3}$	

## Приложение 4

### ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ МЕТОДОМ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Таблица П.4.1

Значения критерия Фишера ( $P = 0,95$ )

Число степеней свободы $f_2$	Число степеней свободы $f_1$								
	1	2	3	4	5	6	12	24	$\infty$
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,5	19,5
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9	8,9	8,7	8,6	8,5
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9	5,8	5,6
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5	4,7	4,5	4,4
6	6	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4	3,8	3,7
7	5,6	4,7	4,4	4,1	4	3,9	3,6	3,4	3,2
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6	3,3	3,1	2,9
10	5	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	2,9	2,7	2,5

Таблица П.4.2

Значения критерия Стьюдента

$f$	$t$	$f$	$t$	$f$	$t$	$f$	$t$
1	12,71	6	2,45	11	2,20	16	2,12
2	4,30	7	2,36	12	2,18	17	2,11
3	3,18	8	2,31	13	2,16	18	2,10
4	2,78	9	2,26	14	2,14	19	2,09
5	2,57	10	2,23	15	2,13	20	2,09

## ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

### Содержание и основные характеристики работы

**Цель выполнения работы.** Цель выполнения работы — получение математической модели технологического режима восстановления свойств цемента с использованием лабораторной мельницы (ЛИВ) и нахождение параметров технологического режима, соответствующих экстремуму целевой функции (максимальному значению активности цемента) в исследуемой области факторного пространства.

**Задачи, решаемые в ходе выполнения работы:**

описание параметров эксперимента (выявление входных и выходных переменных эксперимента, выделение групп контролируемых и неконтролируемых, управляемых и неуправляемых переменных);

выбор методов исследования;

составление плана эксперимента;

получение экспериментальных данных;

обработка результатов эксперимента методами математической статистики;

формирование основных выводов и предложений по результатам проведения исследований.

**Краткая характеристика объекта исследования.** Для улучшения свойств вяжущего (цемента) используется лабораторная электромагнитная мельница (ЛИВ). В камере установки происходит обработка материала мелющими телами, движущимися под воздействием вращающегося электромагнитного поля.

Основными управляемыми переменными факторами технологического режима восстановления свойств цемента, изменением которых можно управлять процессом восстановления свойств цемента, являются:

время обработки материала;

объем заполнения камеры материалом;

вид материала, из которого изготовлены мелющие тела (что определяет ферромагнитные свойства мелющих тел, находящихся под воздействием электромагнитного поля);

длина мелющих тел;

диаметр мелющих тел;

количество мелющих тел.

К неконтролируемым постоянным технологическим факторам процесса восстановления свойств цемента относятся такие параметры функционирования мельницы электромагнитного действия (ЛИВ), как:

частота электромагнитного поля;

мощность электромагнитного поля;

частота вращения генератора электромагнитного поля.

Так как кроме процесса восстановления свойств цемента в мельнице электромагнитного действия (ЛИВ) эксперимент предполагает приготовление и исследование свойств образцов бетона, изготовленных с использованием активизированного вяжущего, то в качестве факторов, определяющих чистоту эксперимента, включаются:

а) характеристики составляющих цементно-песчаной смеси:

влажность вяжущего (цемента);

гранулометрический состав песка;

химический состав песка;

влажность песка;

б) технологические характеристики бетонного раствора:

время схватывания цементного теста;

пластичность раствора;

в) технологические параметры изготовления образцов:  
продолжительность вибрационной обработки уложенного в формочки бетонного раствора;

время выдерживания образцов в гидравлической ванне;

г) технологические параметры испытательных приборов:  
соответствие номинальной и фактической нагрузки, передаваемой испытательными приборами на образцы;

интенсивность разрушающей нагрузки на образцы.

Данные факторы относятся к контролируемым переменным факторам, оказывающим влияние на результативные признаки процесса восстановления свойств цемента, которые должны быть установлены на неизменном уровне для всех опытов.

К контролируемым результативным признакам (выходным переменным) процесса восстановления свойств цемента относятся:

активность цемента (прочность образцов-балочек на сжатие)  $R_{сж}$ ;

энергозатраты на процесс восстановления свойств вяжущего (цемента), определяемые продолжительностью обработки материала в мельнице, кВт/ч;

показатели, характеризующие эффективность процесса восстановления свойств вяжущего (цемента)  $\Xi$  (отношение разницы в стоимости активизированного и неактивизированного вяжущего к энергозатратам на процесс восстановления свойств цемента в стоимостном выражении).

**Выбор и краткое описание методов и средств, принятых для решения поставленных задач.** Для достижения поставленной цели принято планирование эксперимента осуществлять методом ПФЭ, что даст возможность по полученным экспериментальным данным построить математическую модель процесса восстановления свойств цемента, а также произвести оптимизационный поиск.

Обработку результатов эксперимента для получения математической модели принято осуществлять методом наименьших квадратов. Оптимизационные задачи будут решаться графическим методом.

## Планирование эксперимента

**Формирование основных параметров эксперимента.** Основными управляемыми переменными (факторами) технологического режима восстановления свойств цемента, изменением которых будет управляться процесс восстановления свойств цемента, выбраны:

фактор № 1 — время обработки материала  $x_1$ ;

фактор № 2 — количество мелящих тел  $x_2$ .

На основании имеющейся информации принято решение ограничить исследование функции в следующей области факторного пространства:

1. Время обработки материала  $x_1$ .

Исследуемый диапазон изменения времени обработки материала принят равным 20...60 с. Следовательно, основным уровнем исследования данного фактора будет время обработки материала, равное  $x_1 = 40$  с, интервал варьирования  $\Delta x_1 = 20$  с.

2. Количество мелящих тел. Исследуемый диапазон изменения количества мелящих тел принят равным 60...100 г. Основным уровнем исследования данного фактора является количество мелящих тел  $x_2 = 60$  г, а интервал варьирования  $\Delta x_2 = 20$  г.

В качестве целевой функции (выходной переменной) процесса восстановления свойств цемента выступает активность цемента (прочность образцов-балочек на сжатие)  $R_{сжi}$  (табл. П.5.1).

Для проведения эксперимента планирование принято осуществлять методом ПФЭ, т. е. разрабатывается план ПФЭ типа  $3^2$  (табл. П.5.2).

## Основные характеристики плана эксперимента

Характеристика	Факторные признаки	
	Время помолы, с	Количество мелящих тел, г
Обозначение	$x_1$	$x_2$
Основной уровень	40	80
Интервал варьирования	20	20
Верхний уровень	60	100
Нижний уровень	20	60

Разрабатывается план ПФЭ типа  $3^2$  (табл. П.5.2).

План проведения ПФЭ типа  $3^2$ 

Число опытов	Номер опыта	Матрица планирования		
		$x_1$	$x_2$	$y_i$
1	2	3	4	9
11	1	-1	-1	$y_1$
	2	-1	0	$y_2$
	3	-1	+1	$y_3$
	4	0	-1	$y_4$
	5.1	0	0	$y_{5.1}$
	5.2	0	0	$y_{5.2}$
	5.3	0	0	$y_{5.3}$
	6	0	+1	$y_6$
	7	+1	-1	$y_7$
8	+1	0	$y_8$	
	9	+1	+1	$y_9$

## Проведение эксперимента

## Расход материалов, необходимых для проведения эксперимента:

1. Расход бетонной смеси.

Расход бетонной смеси на один образец равен

$$B_{об} = \rho_{бет} V_{об},$$

где  $\rho_{бет}$  — средняя плотность бетонного раствора;  $V_{об}$  — объем образца (стандартный размер формочки для одного образца  $0,04 \times 0,04 \times 0,16 = 0,000256 \text{ м}^3$ );

$$B_{об} = 2300 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,000256 \text{ м}^3 = 0,59 \text{ кг}.$$

Расход бетонной смеси на один опыт равен

$$B_{оп} = B_{об} n,$$

где  $B_{об}$  — расход бетонной смеси на один образец;  $n$  — количество образцов, изготавливаемых в одном опыте (согласно рекомендациям нормативных документов  $n = 6$ );

$$B_{оп} = 0,59 \text{ кг} \cdot 6 = 3,54 \text{ кг}.$$

Расход бетонной смеси на весь эксперимент равен

$$B_{эсп} = 1,2 B_{оп} N,$$

где 1,2 — коэффициент, учитывающий необходимость проведения опытов для определения и корректировки консистенции цементного теста;  $B_{оп}$  — расход бетонной смеси на один опыт;  $N$  — общее количество опытов в эксперименте;

$$B_{эсп} = 3,54 \text{ кг} \cdot 11 \cdot 1,2 = 46,73 \text{ кг}.$$

2. Расход составляющих смеси на проведение всего эксперимента.

Расход цемента на весь эксперимент:

$$\Pi = \frac{B_{\text{эксп}}}{\Pi_{\text{н}} + \Pi_{\text{н}} + B_{\text{н}}} \Pi_{\text{н}}$$

где  $B_{\text{эксп}}$  — расход бетонной смеси на весь эксперимент;  $\Pi_{\text{н}}$ ,  $\Pi_{\text{н}}$ ,  $B_{\text{н}}$  — нормативные показатели соотношения компонентов бетонной смеси (нормативное соотношение составляющих бетонной смеси —  $\Pi_{\text{н}} : \Pi_{\text{н}} : B_{\text{н}} = 1 : 3 : 0,4$ ).

$$\Pi = \frac{46,73}{1 + 3 + 0,4} 1 = 10,62 \text{ кг.}$$

Расход песка на весь эксперимент равен

$$\Pi = \frac{B_{\text{эксп}}}{\Pi_{\text{н}} + \Pi_{\text{н}} + B_{\text{н}}} \Pi_{\text{н}};$$

$$\Pi = \frac{46,73}{1 + 3 + 0,4} 3 = 31,86 \text{ кг.}$$

Расход воды на весь эксперимент равен

$$B = \frac{B_{\text{эксп}}}{\Pi_{\text{н}} + \Pi_{\text{н}} + B_{\text{н}}} B_{\text{н}};$$

$$B = \frac{46,73}{1 + 3 + 0,4} 0,4 = 4,25 \text{ л.}$$

3. Расход составляющих смеси на проведение одного опыта.

Расход цемента на проведение одного опыта:

а) расход цемента на изготовление образцов:

$$\Pi_i = \frac{B_{\text{оп}}}{\Pi_{\text{н}} + \Pi_{\text{н}} + B_{\text{н}}} \Pi_{\text{н}},$$

где  $B_{\text{оп}}$  — расход бетонной смеси на проведение одного опыта;  $i$  — номер опыта ( $i = 1, 2, \dots, N$ );  $\Pi_{\text{н}}$ ,  $\Pi_{\text{н}}$ ,  $B_{\text{н}}$  — нормативные показатели соотношения компонентов бетонной смеси (нормативное соотношение составляющих бетонной смеси  $\Pi_{\text{н}} : \Pi_{\text{н}} : B_{\text{н}} = 1 : 3 : 0,4$ ).

$$\Pi_i = \frac{3,54}{1 + 3 + 0,4} 1 = 0,804 \text{ кг,}$$

где  $i = 1, \dots, 11$ ;

б) расход цемента на проведение опыта по определению консистенции цементного теста равен

$$\Pi_{\text{кон } i} = 0,2\Pi_i;$$

$$\Pi_{\text{кон } i} = 0,804 \text{ кг} \cdot 0,2 = 0,161 \text{ кг.}$$

Расход песка на проведение одного опыта:

а) расход песка на изготовление образцов:

$$\Pi_i = \frac{B_{\text{оп}}}{\Pi_{\text{н}} + \Pi_{\text{н}} + B_{\text{н}}} \Pi_{\text{н}},$$

$$\Pi_i = \frac{3,54}{1 + 3 + 0,4} 3 = 2,414 \text{ кг,}$$

где  $i = 1, \dots, 11$ .

б) расход песка на проведение опыта по определению консистенции цементного теста:

$$\Pi_{\text{кон } i} = 0,2\Pi_i;$$

$$\Pi_{\text{кон } i} = 2,414 \cdot 0,2 = 0,483 \text{ кг.}$$

Расход воды на проведение одного опыта:

а) расход воды на изготовление образцов равен

$$V_i = \frac{B_{\text{оп}}}{\Pi_{\text{н}} + \Pi_{\text{н}} + B_{\text{н}}} V_{p,i},$$

где  $V_{p,i}$  — расчетное значение водоцементного отношения, определяемое по результатам проверки и корректировки консистенции цементного теста;

$$V_i = 0,804V_{p,i},$$

где  $V_{p,i}$  — показатель, который рассчитывается для каждого опыта;

б) расход воды на проведение опыта по определению консистенции цементного теста:

$$V_{\text{кон } i} = \frac{B_{\text{оп}}}{\Pi_{\text{н}} + \Pi_{\text{н}} + B_{\text{н}}} B_{\text{н}} \cdot 0,2.$$

$$V_{\text{кон } i} = \frac{3,54}{1 + 3 + 0,4} 0,4 \cdot 0,2 = 0,064 \text{ л.}$$

Песок следует подготовить заранее, в количестве, необходимом для проведения всего эксперимента, и дать ему отлежаться для приобретения постоянной влажности.

**Определение консистенции цементного раствора.** Определение и корректировку консистенции бетонной смеси осуществляют для каждого опыта эксперимента в соответствии с п. 5.3. прил. 5.

Водоцементное отношение  $V_p$ , соответствующее нормальной консистенции бетонной смеси (расплыв конуса 106...115 мм), рассчитывается следующим образом:

$$V_{p,i} = \frac{\Pi_{k,i}}{B_{k,i}},$$

где  $\Pi_{k,i}$ ,  $B_{k,i}$  — расход цемента и воды соответственно в  $i$ -м опыте при достижении распыла конуса 106...115 мм.

В табл. П.5.3 представлены результаты проведения опыта по определению и корректировке консистенции цементного теста.

Таблица П.5.3

Результаты проведения опыта по определению консистенции цементного теста

Номер опыта	Нормативное соотношение Ц/П/В	Опыты по определению консистенции						Расчетное соотношение Ц/П/В
		1		2		3		
		(В/Ц) <sub>1</sub>	$D_{\text{конус}}$	(В/Ц) <sub>2</sub>	$D_{\text{конус}}$	(В/Ц) <sub>3</sub>	$D_{\text{конус}}$	
1	1/3/0,4	0,4	106	—	—	—	—	1/3/0,4
2	1/3/0,4	0,4	107	—	—	—	—	1/3/0,4
3	1/3/0,4	0,4	109	—	—	—	—	1/3/0,4
4	1/3/0,4	0,4	107	—	—	—	—	1/3/0,4
5	1/3/0,4	0,4	109	—	—	—	—	1/3/0,4
6	1/3/0,4	0,4	114	—	—	—	—	1/3/0,4
7	1/3/0,4	0,4	109	—	—	—	—	1/3/0,4
8	1/3/0,4	0,4	110	—	—	—	—	1/3/0,4
9	1/3/0,4	0,4	112	—	—	—	—	1/3/0,4

**Проведение основного эксперимента.** За одно занятие проводится три опыта. Опыты включают в себя следующие этапы:

активизацию цемента (технологические режимы принимаются в соответствии с планом проведения эксперимента);

корректировку состава бетонной смеси;

изготовление образцов;

определение прочностных характеристик образцов через соответствующее время.

Откорректированные данные по потребности в материалах на каждый опыт заносятся в табл. П.5.4.

Таблица П.5.4

**Потребность в материалах**

Номер опыта	Материалы	Потребность в материалах		
		По определению консистенции	На изготовление образцов	Всего
1	Всего смеси, кг	0,85	3,54	4,49
	Песок, кг	0,5	2,414	2,914
	Цемент, кг	0,25	0,804	1,054
	Вода, л	0,1	0,322	0,422
2	Всего смеси, кг	0,85	3,54	4,49
	Песок, кг	0,5	2,414	2,914
	Цемент, кг	0,25	0,804	1,054
	Вода, л	0,1	0,322	0,422
3	Всего смеси, кг	0,85	3,54	4,49
	Песок, кг	0,5	2,414	2,914
	Цемент, кг	0,25	0,804	1,054
	Вода, л	0,1	0,322	0,422
4	Всего смеси, кг	0,85	3,54	4,49
	Песок, кг	0,5	2,414	2,914
	Цемент, кг	0,25	0,804	1,054
	Вода, л	0,1	0,322	0,422
5	Всего смеси, кг	0,85	3,54	4,49
	Песок, кг	0,5	2,414	2,914
	Цемент, кг	0,25	0,804	1,054
	Вода, л	0,1	0,322	0,422
6	Всего смеси, кг	0,85	3,54	4,49
	Песок, кг	0,5	2,414	2,914
	Цемент, кг	0,25	0,804	1,054
	Вода, л	0,1	0,322	0,422
7	Всего смеси, кг	0,85	3,54	4,49
	Песок, кг	0,5	2,414	2,914
	Цемент, кг	0,25	0,804	1,054
	Вода, л	0,1	0,322	0,422
8	Всего смеси, кг	0,85	3,54	4,49
	Песок, кг	0,5	2,414	2,914
	Цемент, кг	0,25	0,804	1,054
	Вода, л	0,1	0,322	0,422
9	Всего смеси, кг	0,85	3,54	4,49
	Песок, кг	0,5	2,414	2,914
	Цемент, кг	0,25	0,804	1,054
	Вода, л	0,1	0,322	0,422

**Подготовка материалов.** От подготовленного песка отмеряем порции в соответствии с табл. П.5.4.

Цемент, в количестве, необходимом для проведения трех опытов, просеивается через сито  $\varnothing 0,9$  мм.

**Активизация цемента.** Готовятся порции мелящих тел по плану проведения соответствующих опытов.

Порции цемента поочередно подвергаются активизации в соответствии с планом эксперимента.

Извлечение мелящих тел из цемента, прошедшего активизацию, производится при помощи магнита.

**Приготовление смеси.** Отвешивают необходимое количество песка и цемента (в соответствии с табл. П.4), высыпают их в предварительно протертую мокрой тканью сферическую чашу, перемешивают цемент с песком лопатой в течение 1 мин. Температура помещения по ГОСТ 310.1—78. Затем в центре сухой смеси делают лунку, вливают в нее воду в необходимом количестве, дают воде впитаться в течении 0,5 мин и перемешивают смесь в течении 1 мин.

**Изготовление образцов.** Перед изготовлением образцов внутреннюю поверхность стенок форм и поддона слегка смазывают машинным маслом. Стыки наружных стенок друг с другом и с поддоном формы промазывают тонким слоем солидола или другой густой смазки.

Для уплотнения раствора форму балочек с насадкой жестко закрепляют в центре виброплощадки. Допускается устанавливать две формы, симметрично расположенные относительно центра виброплощадки. Форму по высоте наполняют приблизительно на 1 см раствором и включают вибрационную площадку. В течение первых 2 мин вибрации все три гнезда формы равномерно небольшими порциями заполняются раствором. По истечении 3 мин от начала вибрации виброплощадку отключают. Форму снимают с виброплощадки, срезают ножом, смоченным водой, излишек раствора, заглаживают поверхность образцов вровень с краями формы и маркируют их.

После изготовления образцы в формах хранят ( $24 \pm 2$ ) ч в ванне с гидравлическим затвором.

По истечении времени хранения образцы осторожно расформовывают и укладывают в ванны с питьевой водой в горизонтальном положении так, чтобы они не соприкасались друг с другом. Вода должна покрывать образцы не менее чем на 2 см. Воду меняют каждые 14 сут. Температура ее при замене должна быть ( $20 \pm 2$ ) °С, как и при хранении образцов. По истечении срока хранения образцы вынимают из воды и не позднее чем через 30 мин подвергают испытанию. Непосредственно перед испытанием образцы должны быть насухо вытерты.

Результаты проведения опыта 1 представлены в табл. П.5.5

## Результаты проведения опыта 1

Номер опыта	Дата активизации	Дата изготовления образцов	Пластичность смеси	Дата испытания на прочность	Шифр образца	Испытание на прочность				
						Изгиб	Сжатие			
						Предельная прочность, кгс	Разрушающая нагрузка, кгс	Предельная прочность, кгс/м <sup>2</sup>	Средняя прочность, кгс/м <sup>2</sup>	
									7-дневная	28-дневная
1	01.01.01	01.01.01	106	08.01.01	1.1		0,1478	83,8	84,1	144
							0,1489	84,4		
					1.2		0,1398	79,2	79,4	136
							0,1404	79,6		
					1.3		0,1413	80,1	80,6	138
							0,1431	81,1		
					1.4		0,1457	82,6	82,9	142
							0,1468	83,2		
					1.5		0,1363	77,3	77,7	133
							0,1413	80,1		
					1.6		0,1392	78,9	78,8	135
							0,1388	78,7		

Примечание: площадь рабочего сечения  $F = 0,042 \cdot 0,042 \text{ м}^2$ .

На основании таблиц с результатами проведения опытов (в качестве примера приведена таблица с результатами опыта 1 — табл. П.5.5) заполняется матрица планирования, только не в безразмерном виде, а в количественном выражении (табл. П.5.6).

Таблица П.5.6

### Результаты эксперимента

Число опытов	Номер опыта	Матрица планирования		
		$x_1$	$x_2$	$y_i$
1	2	3	4	9
11	1	20	60	140
	2	20	80	182
	3	20	100	217
	4	40	60	151
	5.1	40	80	198
	5.2	40	80	196
	5.3	40	80	201
	6	40	100	247
	7	60	60	162
	8	60	80	209
	9	60	100	228

### Обработка экспериментальных данных

**Метод наименьших квадратов.** Вид уравнения регрессии удобно определять, если значения исследуемых факторов представлены рядами параллельных данных.

В настоящей работе используется факторное планирование, вследствие этого данные представлены в виде матрицы сочетаний факторных признаков при трехуровневом представлении каждого фактора. Но для определения вида уравнения регрессии можно представить результаты эксперимента в виде рядов параллельных данных, приведенных в табл. П.5.7.

Таблица П.5.7

#### Представление экспериментальных данных в виде рядов параллельных данных (для определения вида уравнения регрессионной зависимости)

Переменные факторы	Уровни изменения входных переменных		
	+1	0	-1
$x_1$	20	40	60
$x_2$	60	80	100
$y_i$	140	198	228

На основании этих данных можно представить, каким образом изменяется значение результативного признака с увеличением значений факторных признаков.

Если результативный и факторный признаки возрастают одинаково, примерно в арифметической прогрессии, то это свидетельствует о том, что связь между ними линейная, если же один признак увеличивается, а другой уменьшается, то связь гиперболическая.

Если результативный признак увеличивается в арифметической прогрессии, а факторный значительно быстрее, то используется параболическая или другая степенная регрессия.

На рис. П.5.1 представлена графическая интерпретация данных табл. П.5.7.

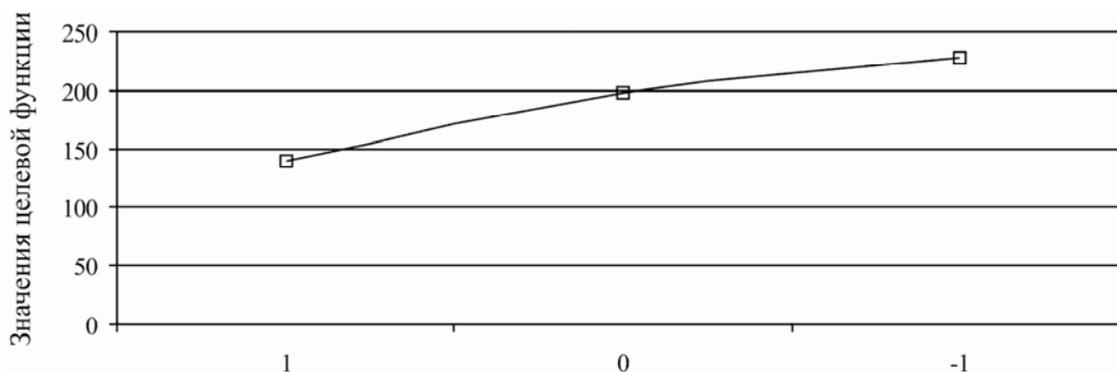


Рис. П.5.1. Уровни изменения факторов: —□— вид функциональной зависимости

Как видно по рис. П.5.1, для обработки экспериментальных данных целесообразно выбрать линейный, параболический либо полиномиальный тип уравнения регрессии.

Для обработки результатов эксперимента методом наименьших квадратов принято решение использовать уравнение линейного типа:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2.$$

Для вычисления коэффициентов уравнения по методу наименьших квадратов система линейных уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} a_0N + a_1\sum x_1 + a_2\sum x_2 = \sum y, \\ a_0\sum x_1 + a_1\sum x_1^2 + a_2\sum x_2x_1 = \sum yx_1, \\ a_0\sum x_2 + a_1\sum x_1x_2 + a_2\sum x_2^2 = \sum yx_2. \end{cases}$$

Вспомогательные данные, необходимые для составления системы уравнений представим в табл. П.5.8.

Таблица П.5.8

**Вспомогательные данные для составления системы уравнений**

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_1x_2$	$yx_1$	$yx_2$	$y$
1	20	60	400	3600	1200	2800	8400	140
2	20	80	400	6400	1600	3640	14 560	182
3	20	100	400	10 000	2000	4340	21 700	217
4	40	60	1600	3600	2400	6040	9060	151
5	40	80	1600	6400	3200	7920	15 840	198
6	40	100	1600	10 000	4000	9880	24 700	247
7	60	60	3600	3600	3600	9720	9720	162
8	60	80	3600	6400	4800	12 540	16 720	209
9	60	100	3600	10 000	6000	13 680	22 800	228
$\Sigma$	360	720	16 800	60 000	28 800	70 560	143 500	1734

Система уравнений для определения коэффициентов уравнения регрессии выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} 9a_0 + 360a_1 + 720a_2 = 1734, \\ 360a_0 + 16\,800a_1 + 28\,800a_2 = 70\,560, \\ 720a_0 + 28\,800a_1 + 60\,000a_2 = 143\,500. \end{cases}$$

Решение системы уравнений дает следующие значения коэффициентов регрессии:

$$a_0 = 13,333; a_1 = 0,5; a_2 = 1,992.$$

Уравнение регрессии выглядит следующим образом:

$$y = 13,33 + 0,50x_1 + 1,99x_2.$$

Далее производится проверка адекватности полученной регрессионной зависимости.

Оценка уравнения регрессии начинается с определения  $F$ -критерия, который характеризует адекватность модели исследуемому процессу:

$$F = \frac{\sigma_{\text{на}}^2}{\sigma_3^2} = 11,67 / 2,11 = 18,48,$$

где  $\sigma_{\text{на}}^2$  — оценка дисперсии неадекватности;

$$\sigma_{\text{на}}^2 = \frac{1}{N - B} \sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2 = 1 / (9 - 3) 531,83 = 75,98,$$

где  $N$  — число опытов полного факторного эксперимента (опыты основного уровня не берутся, т. е.  $N = 9$ );  $B$  — число значимых коэффициентов регрессионной модели;  $y_j$  и  $\hat{y}_j$  — экспериментальное и расчетное значение результирующего признака в  $j$ -й точке плана;  $\sigma_3^2$  — дисперсия воспроизводимости эксперимента:

$$\sigma_3^2 = \frac{1}{Nr} \sum_{j=1}^N \sigma_j^2 = 1 / (1 \cdot 3) \cdot 12,33 = 18,48,$$

где  $\sigma_j^2$  — оценка дисперсии в  $i$ -й серии параллельных опытов:

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^r (y_{j,i} - \bar{y}_j)^2 = 1 / (3 - 1) 24,67 = 12,33,$$

где  $y_{i,j}$  — значения результирующего признака в серии параллельных опытов в  $j$ -й точке плана;  $\bar{y}_j$  — среднее арифметическое значений параллельных опытов в  $j$ -й точке плана;  $r$  — количество параллельных опытов в  $j$ -й точке плана.

В данной работе проводилась одна серия параллельных опытов для точки плана, где факторные признаки установлены на основном уровне исследования, т. е. при вычислении дисперсии воспроизводимости эксперимента  $n = 1$  и  $r = 3$ .

Расчетные значения  $F$  сравнивают с табличными  $F_{\text{табл}}$ . Если при  $\alpha = 0,05$   $F_p < F_{\text{табл}}$ , то модель адекватна.

Значения  $F_{\text{табл}}$  представлены в прил. 4, при числе степеней свободы числителя  $f_1 = f_{\text{на}} = N - B$  ( $N$  — количество опытов, без опытов основного уровня, т. е.  $N = 9$ ;  $B$  — число значимых коэффициентов регрессионной модели), а знаменателя  $f_2 = f_3 = n(r - 1)$  ( $n$  — количество серий параллельных опытов, проведенных для расчета дисперсии воспроизводимости,  $r$  — число параллельных опытов в  $j$ -й серии, т. е.  $n = 1$ ,  $r = 3$ ).

Данные для определения адекватности моделей заносим в табл. П.5.9 и табл. П.5.10.

Таблица П.5.9

Вспомогательные данные для расчета дисперсии неадекватности

Номер опыта	$y_j$	$\hat{y}_j$	$y_j - \hat{y}_j$	$(y_j - \bar{y}_j)^2$
1	140,00	142,83	-2,83	8,0278
2	182,00	182,67	-0,67	0,4444
3	217,00	222,50	-5,50	30,2500
4	151,00	152,83	-1,83	3,3611
5	198,00	192,67	5,33	28,4444

Номер опыта	$y_j$	$\hat{y}_j$	$y_j - \hat{y}_j$	$(y_j - \bar{y}_j)^2$
6	247,00	232,50	14,50	210,2500
7	162,00	162,83	-0,83	0,6944
8	209,00	202,67	6,33	40,1111
9	228,00	242,50	-14,50	210,2500
$\Sigma$				531,8333

Таблица П.5.10

**Вспомогательные данные для расчета дисперсии воспроизводимости эксперимента**

Номер опыта	$y_{ij}$	$\bar{y}_j$	$y_{ij} - y_j$	$(y_{ij} - \bar{y}_j)^2$
5.1	198	198,3	-0,33	0,111
5.2	195		-3,33	11,111
5.3	202		3,67	13,444
5				24,667

Далее, чтобы иметь полную уверенность в адекватности модели, рассчитываем среднюю ошибку аппроксимации:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum \frac{y_j - \hat{y}_j}{y_j} 100 \% = ((1 / 9) \cdot 0,2464) 100 \% = 3 \%$$

Средняя ошибка аппроксимации показывает в процентах среднее для всех значений результативного признака отклонение расчетных значений. Модель можно считать адекватной, если ошибка аппроксимации будет находиться в пределах 12...15 %.

Результаты оценки уравнения регрессии представляем в табл. П.5.11.

Таблица П.5.11

**Результаты сравнения уравнений регрессии**

Тип уравнения	Значение $F$ -критерия ( $P = 0,95$ )		$\varepsilon, \%$
	расчетное	табличное	
Параболическое	18,5	19,3	3

На основании данных табл. П.5.11 можно сделать вывод о высокой степени адекватности полученной математической модели изучаемому процессу (расчетное значение  $F$ -критерия менее табличного значения, средняя ошибка аппроксимации невелика — всего 3 %).

Значимость коэффициентов регрессии проверяется с помощью  $t$ -критерия:

$$t(a_0) = 1,53; t(a_1) = 2,81; t(a_2) = 11,19.$$

Результаты проверки коэффициентов регрессии вносим в табл. П.5.12.

Таблица П.5.12

**Результаты проверки коэффициентов регрессии по  $t$ -критерию**

Тип уравнения	Значение $t$ -критерия ( $P = 0,95$ )			
	табличное для всех коэффициентов	расчетное		
		$a_0$	$a_1$	$a_2$
Параболическое	2,31	1,53	2,81	11,19

Значения критерия Стьюдента приняты при числе степеней свободы  $f = 8$ .

**Нахождение экстремума функции в исследованной области факторного пространства.** Для нахождения экстремума целевой функции возможно использовать графическую модель, описывающую изменения целевой функции в факторном пространстве, ограниченном исследованной областью (рис. П.5.2).

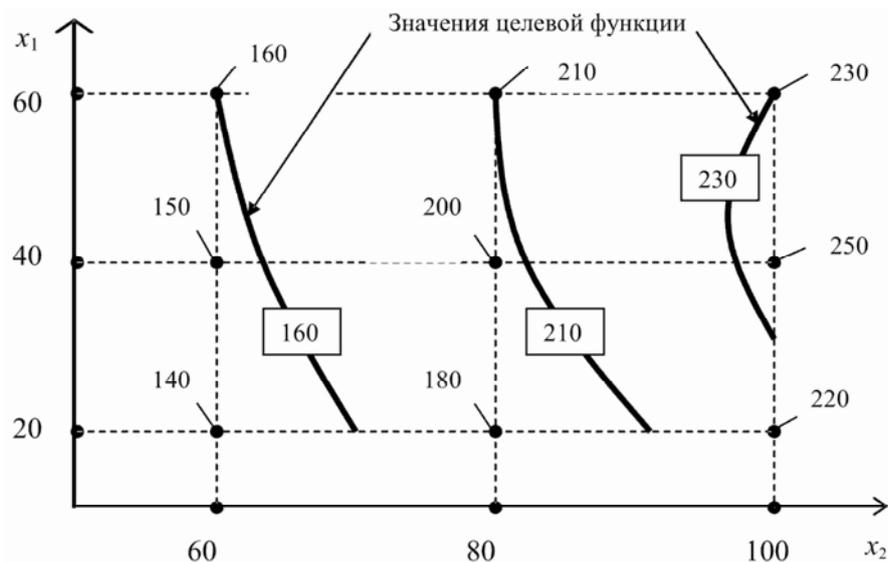


Рис. П.5.2. Графическая модель поведения целевой функции в исследованной области факторного пространства

Как видно на графике, экстремум функции в области факторного пространства, ограниченного значениями первого фактора (время активизации цемента) 20...60 с и второго фактора (количество мелящих тел) 60...100 г, лежит в окрестностях точки с координатами  $x_1 = 45$  и  $x_2 = 100$ . Оптимальное время активизации цемента составляет около 45 с, дальнейшее увеличение времени активизации приводит к уменьшению активности цемента и, следовательно, прочности образцов, количество же мелящих тел может быть еще более увеличено, что позволит повысить активность цемента.

## Основные выводы и предложения по результатам работы

Как и предполагалось перед началом экспериментальных исследований, одними из наиболее значимых факторов, определяющих качество технологического режима восстановления свойств цемента, являются время активизации и количество мелящих тел.

Полученное по экспериментальным данным линейное уравнение регрессии имеет высокую степень адекватности изучаемому процессу и может быть рекомендовано для дальнейших исследований по оптимизации технологического режима улучшения прочностных свойств цемента.

Для уточнения экстремума функции в исследованной области факторного пространства или за ее пределами следует провести дополнительную серию опытов поискового оптимизационного эксперимента. Базовой точкой экстремального поиска целесообразно выбрать точку с координатами  $x_1 = 45$ ,  $x_2 = 100$ . Направление движения к экстремуму следует выбрать в направлении увеличения второго фактора.

Учебное электронное издание

**Кабанов** Вадим Николаевич  
**Николаев** Юрий Николаевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ  
БЕТОНОВ, СТРОИТЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ И СУХИХ СМЕСЕЙ**

Учебно-практическое пособие

Начальник РИО *М. Л. Песчаная*  
Редактор *И. Б. Чижикова*  
Компьютерная правка и верстка *М. А. Денисова*

Минимальные систем. требования:  
PC 486 DX-33; Microsoft Windows XP; Internet Explorer 6.0; Adobe Reader 6.0.

Подписано в свет 19.02.2015.  
Гарнитура «Таймс». Уч.-изд. л. 5,9. Объем данных 3,6 Мбайт.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет»  
Редакционно-издательский отдел  
400074, Волгоград, ул. Академическая, 1  
<http://www.vgasu.ru>, [info@vgasu.ru](mailto:info@vgasu.ru)