

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Строительные материалы и технология строительства»

Д. Ю. Снежков
С. Н. Леонович

**ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ
И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-70 02 01
«Промышленное и гражданское строительство»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области строительства и архитектуры*

Минск
БНТУ
2019

УДК 69.006(075.8)

ББК 386642 я7

С53

Рецензенты:

кафедра «Технология строительного производства»

Гродненского государственного технического университета

(зав. кафедрой, кандидат технических наук, доцент *Д. И. Сафончик*);

зав. НИЛ РУП «Институт БелНИИС»,

кандидат технических наук, доцент *Н. И. Шепелевич*

Снежков, Д. Ю.

- С53 Основы метрологии и контроль качества в строительстве : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство» / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович. – Минск: БНТУ, 2019. – 276 с.
ISBN 978-985-583-183-0.

Рассматриваются вопросы метрологического обеспечения строительства. Содержание учебно-методического пособия соответствует типовой учебной программе дисциплины «Метрология и контроль качества в строительстве» и образовательному стандарту первой ступени высшего образования по специальности 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство».

В первой части учебно-методического пособия изложены основные понятия метрологии, ее структурные составляющие, вопросы классической теории погрешностей измерений и концепция неопределенности измерений. Излагаемый материал проиллюстрирован примерами.

Вторая часть пособия посвящена прикладным вопросам обеспечения качества строительства, включая темы обеспечения точности геометрических параметров в строительстве, и контроля прочностных показателей железобетонных конструкций. Особое внимание уделено неразрушающим методам испытаний бетона в конструкциях. Рассматриваются как стандартизированные, так и перспективные методы испытаний. В основе второй части пособия – актуальные нормативные документы.

УДК 69.006(075.8)

ББК 386642 я7

ISBN 978-985-583-183-0

© Снежков Д. Ю., Леонович С. Н., 2019

© Белорусский национальный
технический университет, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
----------------	---

Часть I. ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

1. СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ	8
1.1. Структурные составляющие метрологии	8
1.2. Метрологическая служба Республики Беларусь	12
2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ МЕТРОЛОГИИ	18
2.1. Система физических величин и единиц физических величин	21
2.2. Алгебра размерностей	28
2.3. Классификация измерений	33
3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ	41
3.1. Виды погрешностей	43
3.2. Систематические погрешности	45
3.3. Случайная погрешность	48
3.4. Статистические характеристики выборки	62
3.5. Математическая обработка результатов измерений	65
3.6. Правила округления результата измерения	75
4. КОНЦЕПЦИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ	77
4.1. Определение стандартной неопределенности по типу <i>A</i>	83
4.2. Определение стандартной неопределенности по типу <i>B</i>	83
4.3. Определение суммарной стандартной неопределенности	85
4.4. Определение расширенной неопределенности	86
4.5. Представление конечного результата измерений	88

Часть II. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ. ДОПУСКИ	90
5.1. Термины и определения	91
5.2. Характеристики точности	92
5.3. Допуски функциональные	96
5.4. Допуски технологические	98
5.5. Расчет точности геометрических параметров	109
6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА МЕХАНИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ИСПЫТАНИЙ	115

6.1. Контроль прочности бетона железобетонных конструкций испытанием образцов.....	123
6.2. Неразрушающие механические методы испытаний прочности бетона	125
6.3. Метод ударного импульса	141
6.4. Перспективные методы индентирования.....	148
7. КОНТРОЛЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ	162
7.1. Методы свободных колебаний (natural oscillation frequencies (NOF)).....	167
7.2. Ультразвуковой импульсный метод контроля бетона	182
7.3. Ультразвуковая дефектоскопия железобетонных конструкций.....	195
7.4. Радиоволновая дефектоскопия.....	199
8. ПОСТРОЕНИЕ ГРАДУИРОВОЧНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ КОСВЕННЫХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ.....	203
8.1. Построение градуировочной зависимости по СТБ 2264	220
8.2. Построение градуировочной зависимости по результатам испытаний прочности бетона в конструкциях по ГОСТ 22690	221
8.3. Построение градуировочной зависимости по контрольным образцам по ГОСТ 22690.....	222
8.4. Построение градуировочной зависимости для ультразвукового импульсного метода по ГОСТ 17624–2012	225
9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА БЕТОНА ПО ПРОЧНОСТИ В КОНСТРУКЦИЯХ	232
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	243
Приложение А	247
Приложение Б	248
Приложение В	256
Приложение Г	261
Приложение Д	264
Приложение Е	265
Приложение Ж	269
Приложение И	272
Приложение К	274

ВВЕДЕНИЕ

Измерение – первичная составляющая процесса получения информации. Процессы измерений выполняются любым объектом живой природы, взаимодействующим с окружающим его миром. Идет ли речь об интенсивности освещения листьев растения, температуре и химическом составе воды для обитающих в ней примитивных организмов или огромном комплексе параметров, воспринимаемых высшими животными, – во всех перечисленных случаях можно обнаружить те процессы, которые с позиции метрологии составляют процесс измерений¹. Но если у объектов живой природы эти процессы «встроены» в их физиологию природой, то в человеческом сообществе – по мере его развития – измерения стали продуктом его сознательной целенаправленной деятельности, применительно к тем объектам и процессам, которые составляют основу общественного существования человека, в том числе в производственной сфере.

Долгое время метрология была в основном описательной наукой о различных мерах и соотношениях между ними. Новое значение метрология обрела в эпоху промышленной революции: она стала совершенно необходима для обеспечения массового производства. Развитие естественных наук привело к появлению более совершенных средств измерений (СИ), а они, в свою очередь, стимулировали развитие наук.

Еще в XVII веке, когда в Европе зародились точные науки, многие ученые понимали, что огромное разнообразие мер тормозит экономический и технический прогресс. Тогда же стали предлагать конкретные способы ликвидации этого хаоса. Первым практическим шагом на пути к желанной цели стало создание метрической системы мер. На основе единицы длины – метра – строилась вся система, получившая название метрической. За единицу площади принимался квадратный метр, за единицу объема – кубический метр, за единицу массы – килограмм (масса кубического дециметра чистой воды при температуре 4 °С). Метрическая система с самого начала была задумана как международная. 26 марта 1791 г. Учредительное собрание Фран-

¹ Поскольку все объекты материального мира находятся в состоянии взаимного информационно-энергетического обмена, то приведенные выше рассуждения в определенной мере справедливы и для объектов «неживой» природы.

ции утвердило предложения Парижской академии наук. Метрическая система внедрялась с большим трудом. Окончательно она была введена во Францию как обязательная лишь с 1 января 1840 г.

Для развития отечественной метрологии многое сделал Д. И. Менделеев (1834–1907). Его можно считать основоположником научного подхода в развитии метрологии. Время с 1892 по 1918 г. называют менделеевским этапом развития метрологии. Это этап научного становления метрологии и активного внедрения ее в практику хозяйственной и научной деятельности. В 1893 г. Д. И. Менделеев преобразует Депо образцовых мер и весов в Главную палату мер и весов – одно из первых в мире научно-исследовательских учреждений метрологического профиля. Известное высказывание ученого: «Наука начинается ... с тех пор, как начинают измерять; точная наука немислима без меры».

Решительный поворот в сторону введения метрической системы в нашей стране произошел 14 сентября 1918 г., когда Совнарком РСФСР принял декрет «О введении международной метрической системы мер и весов». Этот документ положил начало нормативному этапу развития отечественной метрологии. С этого момента важнейшие положения в области метрологии вводятся нормативными актами – поначалу постановлениями правительства, а позже (наряду с ними) нормативно-техническими документами разного уровня.

В настоящее время метрическая система мер официально принята всеми государствами, за исключением США, Либерии и Бирмы (Ньянмы)².

Заметим, что государственное регулирование США³ в сфере метрологии не является столь жестким, как в странах Европы и особенно

² В 1971 г. Национальное бюро стандартов США выпустило отчет «Метрическая Америка», в котором рекомендовало стране перейти на метрическую систему в десятилетний срок, но жесткие временные рамки не ставились и сам переход на метрическую систему предполагал добровольность. Поскольку американские компании открывали все новые и новые производственные мощности за пределами страны, в Европе и Азии возникла необходимость определиться с тем, какие единицы использовать: метрические или традиционные американские. Осознавая эти сложности, в 1988 г. Конгресс внес изменения в Metric Conversion Act, согласно которым метрическая система стала считаться «предпочтительной системой мер и весов США для нужд торговли и коммерции».

в СНГ. В СССР метрология развивалась в качестве государственной дисциплины, так как нужда в повышении точности и воспроизводимости измерений росла по мере индустриализации и роста оборонно-промышленного комплекса. Косвенным следствием такого подхода оказалось государственное регулирование различных областей, относящихся к метрологии. Зарубежная метрология также отталкивалась от требований практики, но эти требования исходили в основном от частных фирм, в частности в США эту задачу взяли на себя негосударственные организации, например, ASTM (*American Society for Testing and Materials*) – американская международная организация, разрабатывающая и издающая добровольные стандарты для материалов, продуктов, систем и услуг. Специфика метрологии СССР сохранилась и в постсоветских республиках – государственные стандарты (эталон) признаются главенствующими в отличие от конкурентной западной среды, где частная фирма может не пользоваться неудобным стандартом или прибором и договориться со своими партнерами о другом варианте удостоверения воспроизводимости измерений.

В Беларуси создание самостоятельных метрологических учреждений началось лишь после революции и окончания гражданской войны. 29 февраля 1924 г. приказом Народного Комиссариата Финансов Беларуси № 47 на базе подотдела мер и весов Наркомфина БССР было основано первое в Беларуси метрологическое учреждение – Белорусская палата мер и весов, которая возглавила метрологическую службу в Республике. Сегодня Республика Беларусь является членом многих международных организаций, направлением деятельности которых является метрология. Международное сотрудничество нашей республики в области метрологии играет заметную роль в процессах интеграции Беларуси в мировую экономику.

Современная метрология, в самом широком понимании, представляет собой науку об измерениях, обеспечении их единства, о способах достижения требуемой точности, а также о методах и средствах достижения указанных целей.

³ В сентябре 1999 г. американская автоматическая миссия Mars Climate Orbiter погибла из-за путаницы между системами: система контроля высоты использовала английскую, а основные навигационные алгоритмы – метрическую. Система управления выбрала неправильный момент перехода на орбиту вокруг Марса – на 100 км ближе расчетного нуля.

Часть I. ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

1. СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

1.1. Структурные составляющие метрологии

В отличие от многих иных областей естественных наук, которые могут рассматриваться в большой степени изолированно одна от другой, предмет изучения метрологии является той общей компонентой, которая присуща любой науке, – ни одна наука немислима без измерений. Повышение точности измерений является одним из инструментов для обнаружения новых качественных эффектов и взаимосвязей явлений материального мира⁴. В свою очередь, потребность в повышении точности измерений стимулирует развитие теоретической основы метрологии. Совершенствование методов и измерительных средств, методов выявления и оценки погрешностей, разработка системы физических величин и их единиц, создание эталонов единиц величин и их воспроизведение – все это сфера деятельности *фундаментальной* (теоретической) метрологии.

Кроме научной составляющей, которая и определяет метрологию как науку, в ней можно выделить прикладную (техническую) и законодательную (организационную) составляющие. Измерения являются важнейшим элементом производственной и коммерческой деятельности человека и сопутствуют ему на протяжении развития цивилизации. Вопросами воспроизведения единиц величин, разработки и производства средств измерений, государственных испытаний средств измерений занимается *прикладная* (техническая) метрология. Без достижения высокой точности измерения перемещений не могла бы появиться такая область науки и техники, как нано-технология. Системы глобального позиционирования GPS (США), ГЛОНАСС (РФ), а затем – GALILEO (Евросоюз) и BEIDOU (Китай), появились лишь тогда, когда ошибки автоматического измерения временных характеристик спутниковых радиосигналов автономными устройствами не были снижены до уровня $\sim 10^{-10}$ секунды.

⁴ Экспериментальное подтверждение существования гравитационных волн стало возможным при доведении погрешности измерений динамических механических перемещений на уровне 10^{-18} м при базе измерений около 4 км.

Для обеспечения единства измерений в масштабе от небольшого предприятия до государства в целом метрология должна быть наделена законодательными функциями. *Законодательная* метрология разрабатывает и внедряет нормы и правила выполнения измерений, устанавливает требования, направленные на достижение единства измерений, порядок разработки и испытаний средств измерений, устанавливает термины и определения в области метрологии, единицы физических величин и правила их применения. Все эти нормы, правила и требования устанавливаются соответствующими нормативно-техническими документами, обязательными к применению. Наличие законодательной составляющей в структуре метрологии отличает эту науку от других естественных наук (физики, химии, биологии и т. д.) и направлено на обеспечение единства измерений.

Законодательство Республики Беларусь об обеспечении единства измерений основывается на Конституции Республики Беларусь и состоит из Закона Республики Беларусь о единстве измерений (см. п. 1) актов Президента Республики Беларусь и иных актов законодательства Республики Беларусь.

Если международными договорами, действующими для Республики Беларусь, установлены иные правила, чем те, которые содержатся в настоящем Законе, то применяются правила международных договоров.

Ниже приведены основные термины, используемые в Законе о единстве измерений, и их определения:

– *государственный метрологический надзор* – деятельность по проверке соблюдения юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями и иными физическими лицами требований законодательства Республики Беларусь об обеспечении единства измерений;

– *Государственный реестр национальных эталонов единиц величин* Республики Беларусь – совокупность сведений, формируемых Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь, о национальных эталонах единиц величин;

– *Государственный реестр средств измерений* Республики Беларусь – совокупность сведений, формируемых Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь о средствах измерений, в отношении которых принято решение об утверждении типа средств измерений, и о выданных сертификатах об утверждении типа средств измерений;

– *единица измерения* – величина, условно принятая за единицу, с которой сравниваются другие однородные величины для выражения их количественного значения по отношению к этой величине;

– *единство измерений* – состояние измерений, при котором их результаты выражены в единицах измерений, допущенных к применению в Республике Беларусь, и точность измерений находится в установленных границах с заданной вероятностью;

– *измерение* – совокупность операций, выполняемых для определения значения величины⁵;

– *калибровка* – составная часть метрологического контроля, включающая выполнение работ, в ходе которых устанавливаются метрологические характеристики средств измерений путем определения в заданных условиях соотношения между значением величины, полученным с помощью средства измерений, и соответствующим значением величины, воспроизводимым эталоном единицы величины;

– *методика выполнения измерений* – совокупность правил и процедур выполнения измерений, которые обеспечивают получение результатов измерений, точность которых находится в установленных границах с заданной вероятностью;

– *метрологическая аттестация средств измерений* – составная часть метрологического контроля, включающая выполнение работ, в ходе которых устанавливаются метрологические характеристики средств измерений;

– *метрологическая служба* – совокупность организационно и (или) функционально связанных между собой юридических лиц, их структурных подразделений, либо структурное подразделение юридического лица, деятельность которых направлена на обеспечение единства измерений;

– *метрологический контроль* – совокупность работ, в ходе выполнения которых устанавливаются или подтверждаются метрологические, технические характеристики средств измерений, определяется соответствие средств измерений, методик выполнения изме-

⁵ В РМГ 29-99 [27] приведено уточнение: *измерение физической величины* – совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

рений требованиям законодательства Республики Беларусь об обеспечении единства измерений, а также соответствие методик выполнения измерений своему назначению;

– *метрологическое подтверждение пригодности методик выполнения измерений* – составная часть метрологического контроля, включающая выполнение работ, в ходе которых определяется соответствие методик выполнения измерений требованиям законодательства Республики Беларусь об обеспечении единства измерений, а также их соответствие своему назначению;

– *национальный метрологический институт* – юридическое лицо, подчиненное Государственному комитету по стандартизации Республики Беларусь, на которое возложены проведение фундаментальных и прикладных научных исследований в области обеспечения единства измерений, хранение и применение национальных эталонов единиц величин в целях обеспечения прослеживаемости результатов измерений до единиц измерений Международной системы единиц, принятой Генеральной конференцией мер и весов и рекомендованной Международной организацией законодательной метрологии (далее – Международная система единиц), и иные функции в соответствии с настоящим Законом;

– *национальный эталон единицы величины* – эталон единицы величины, утвержденный решением Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь в качестве национального эталона единицы величины;

– *обеспечение единства измерений* – деятельность, направленная на достижение и поддержание единства измерений в соответствии с требованиями законодательства Республики Беларусь об обеспечении единства измерений;

– *поверитель* – физическое лицо, являющееся работником юридического лица или индивидуального предпринимателя, либо индивидуальным предпринимателем и подтвердившее свою профессиональную компетентность в осуществлении поверки в соответствии с законодательством Республики Беларусь об оценке соответствия;

– *поверка* – составная часть метрологического контроля, включающая выполнение работ, в ходе которых подтверждаются метрологические характеристики средств измерений и определяется соответствие средств измерений требованиям законодательства Республики Беларусь об обеспечении единства измерений;

– *система обеспечения единства измерений* Республики Беларусь – комплекс мер по государственному регулированию и управлению, государственному метрологическому надзору и метрологическому контролю, осуществляемых государственными органами, юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями и иными физическими лицами в целях обеспечения единства измерений;

– *средство измерений* – техническое средство, предназначенное для измерений, воспроизводящее и (или) хранящее единицу измерения, а также кратные либо дольные значения единицы измерения, имеющее метрологические характеристики, значения которых принимаются неизменными в течение определенного времени;

– *сфера законодательной метрологии* – установленные настоящим Законом и иными законодательными актами Республики Беларусь сферы деятельности, в которых в целях обеспечения единства измерений осуществляются государственное регулирование и управление, а также государственный метрологический надзор;

– *утверждение типа средств измерений* – составная часть метрологического контроля, включающая выполнение работ, в ходе которых на основании государственных испытаний средств измерений устанавливаются их метрологические и технические характеристики, определяется соответствие средств измерений требованиям законодательства Республики Беларусь об обеспечении единства измерений и принимается решение об утверждении типа средств измерений;

– *эталон единицы величины* – средство измерений, утвержденное в соответствии с правилами, установленными Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь, в качестве эталона единицы величины.

1.2. Метрологическая служба Республики Беларусь

Какими бы правильными и прогрессивными не были нормативные акты, без надлежащей системы государственного контроля за их исполнением они могут остаться лишь декларациями. В Республике Беларусь создана Система обеспечения единства измерений. Для ее организации и функционирования в Республике Беларусь действует метрологическая служба, возглавляемая Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь (рис. 1.1).

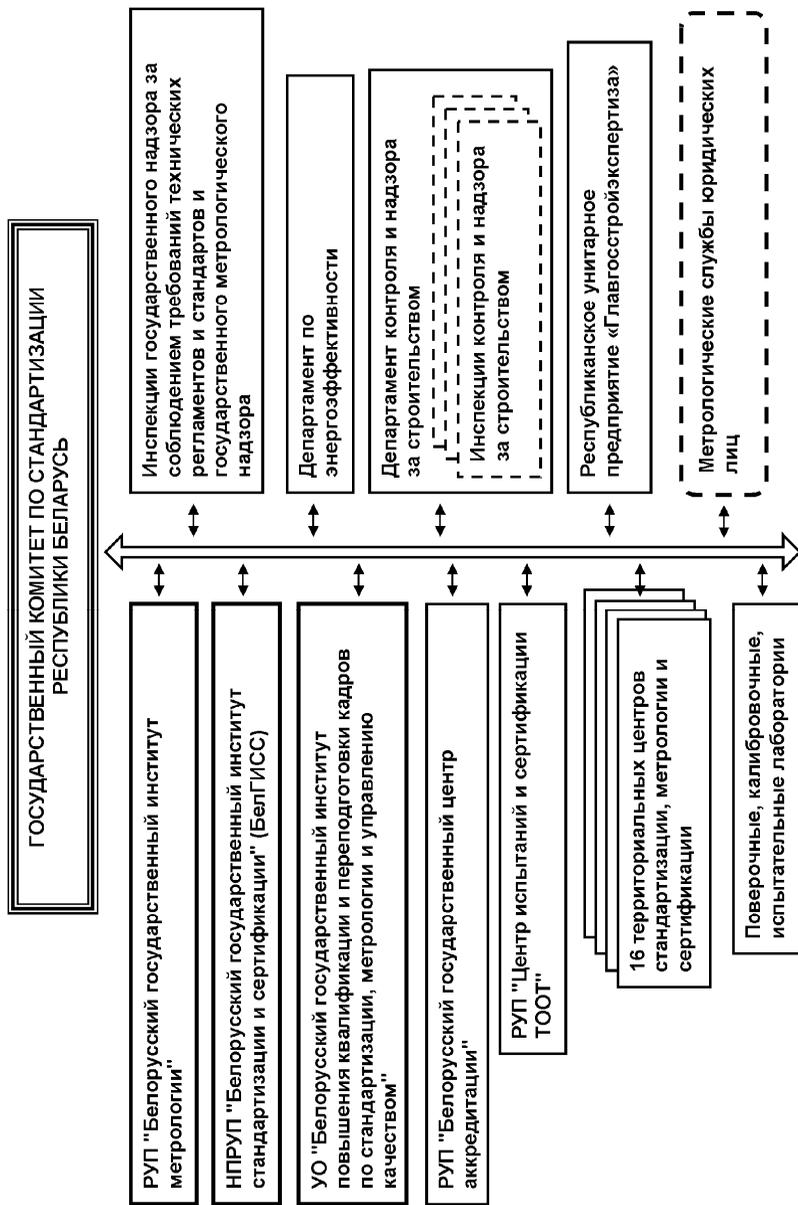


Рис. 1.1. Организационная структура метрологической службы Республики Беларусь

Белорусский государственный институт метрологии (БелГИМ) является одним из главных звеньев Системы обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Сфера деятельности института постоянно расширялась. Сегодня она охватывает разработку и изготовление эталонов и стандартных образцов; испытания, метрологическую аттестацию, поверку, калибровку средств измерений; создание и поддержание эталонной базы республики; проведение высокоточных измерений; разработку технических нормативных правовых актов; испытания и сертификацию продукции, услуг, персонала и систем менеджмента; исследования в области метрологии; стажировку специалистов и обучение метрологов. БелГИМ имеет статус научной организации. На него возложены функции:

- главного центра национальных эталонов Республики Беларусь;
- главного центра времени и частоты;
- головной организации по стандартизации в области метрологии;
- головной организации Государственной службы стандартных образцов.

Свою историю Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации (БелГИСС) ведет с 1972 г., когда свою деятельность начал Минский филиал Центрального конструкторского бюро «Эталон». В 1992 г. после распада СССР это предприятие, пройдя структурные преобразования, получило статус института. Через пять лет решением Правительства институт передается в ведение Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь. Сегодня институт является центральным государственным научно-практическим предприятием Госстандарта в области технического нормирования, стандартизации, оценки соответствия, информационно-технического обеспечения и системного менеджмента. Спектр деятельности института включает в себя следующие направления:

- методология в области технического регулирования и стандартизации (разработка основополагающих стандартов систем технического нормирования и стандартизации, участие в работе национальных и межгосударственных технических комитетов по стандартизации);
- разработка технических регламентов, стандартов и технических условий;

– информационное обеспечение в области технического нормирования и стандартизации (ведение Национального фонда ТНПА, официальное опубликование и распространение ТНПА);

- сертификация продукции;
- испытания продукции;
- сертификация услуг;
- сертификация систем менеджмента;
- качество, системный менеджмент и деловое совершенство;
- каталогизация, классификация и кодирование технико-экономической и социальной информации Республики Беларусь.

Государственный строительный надзор является составной частью системы государственного регулирования строительной деятельности на территории Республики Беларусь и осуществляется в целях обеспечения эксплуатационной надежности и безопасности объектов строительства, соблюдения установленного порядка строительства объектов, государственной защиты интересов потребителей строительной продукции и общества.

Государственный строительный надзор осуществляется за объектами строительства, реконструкции, расширения, реставрации, капитального ремонта независимо от их назначения, форм собственности, источников финансирования и способов строительства, за исключением объектов дачного и садоводческого строительства, объектов, для строительства которых не требуется получение разрешения на производство строительно-монтажных работ, а также объектов и видов работ, подконтрольных другим органам государственного надзора в соответствии с законодательством Республики Беларусь.

Главной задачей органов государственного строительного надзора является надзор за соблюдением участниками инвестиционной деятельности, осуществляющими строительство, требований законодательства Республики Беларусь, нормативно-технической и утвержденной проектно-сметной документации в целях обеспечения эксплуатационной надежности и безопасности объектов строительства. Единую систему органов государственного строительного надзора составляют:

- Департамент контроля и надзора за строительством Государственного комитета по стандартизации;
- Инспекции Департамента по областям и г. Минску;
- специализированная инспекция Департамента.

Органы государственного строительного надзора в соответствии с законодательством:

- проверяют на объектах, для строительства которых требуется получение разрешения на производство строительно-монтажных работ, наличие у заказчиков, застройщиков документов, предусмотренных законодательством Республики Беларусь;

- выдают в установленном порядке заказчикам, застройщикам разрешения на производство строительно-монтажных работ, регистрируют объекты строительства и ведут их учет;

- осуществляют контроль за соблюдением требований технических нормативных правовых актов при строительстве, утвержденной проектной документации при выполнении строительно-монтажных работ, а также за соответствием используемых при строительстве материалов, изделий и конструкций проектным решениям и сертификатам для обеспечения эксплуатационной надежности и безопасности;

- выдают в пределах своей компетенции заключения о соответствии объектов строительства требованиям технических нормативных правовых актов и проектной документации, а также о готовности этих объектов к приемке в эксплуатацию;

- вносят в местные исполнительные и распорядительные органы и при необходимости в соответствующие государственные органы предложения об изменении отчетных данных о вводе в эксплуатацию объектов строительства в случае нарушения порядка их приемки в эксплуатацию;

- участвуют в работе комиссий по расследованию обстоятельств строительных аварий;

- рассматривают обращения физических и юридических лиц по вопросам, отнесенным к их компетенции;

- дают заключения по проектам технических регламентов и иных технических нормативных правовых актов;

- осуществляют иные полномочия, предусмотренные законодательством.

Органы государственного строительного надзора приостанавливают, запрещают производство работ на объектах строительства в случае:

- выявления дефектов и (или) нарушений, создающих угрозу деформации либо обрушения зданий, сооружений, их отдельных частей, инженерных коммуникаций, конструкций;

– осуществления самовольного строительства или строительства с отступлением от утвержденной проектной документации.

Органы государственного строительного надзора вносят заказчикам, застройщикам, подрядчикам, разработчикам проектной документации, организациям, выпускающим строительную продукцию, представления:

– о привлечении к ответственности должностных лиц, нарушающих законодательство в области строительной деятельности и не выполняющих предписаний органов государственного строительного надзора;

– отстранении от работы на объектах строительства должностных лиц подрядчиков, систематически не обеспечивающих выполнения обязательных для соблюдения требований технических нормативных правовых актов и требований проектной документации, а также работников, неудовлетворительно осуществляющих проведение контроля за качеством работ, технический надзор и авторский надзор за строительством;

– несоответствии строительных материалов и оборудования обязательным для соблюдения требованиям технических нормативных правовых актов и требованиям о запрете их использования в строительстве.

В соответствии с Процессуально-исполнительным кодексом Республики Беларусь об административных правонарушениях органы государственного строительного надзора выступают органом, ведущим административный процесс, осуществляют регистрацию, учет административных правонарушений и передачу сведений о правонарушениях в органы внутренних дел в установленном порядке.

Основными принципами обеспечения единства измерений являются:

– приоритетное применение единиц измерений Международной системы единиц;

– применение национальных эталонов единиц величин;

– прослеживаемость результатов измерений до единиц измерений Международной системы единиц, воспроизводимых национальными эталонами единиц величин и (или) международными эталонами единиц величин;

– открытость и доступность информации в области обеспечения единства измерений, за исключением информации, отнесенной

в установленном порядке к категории информации с ограниченным доступом;

– гармонизация национальных и международных требований об обеспечении единства измерений.

2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ МЕТРОЛОГИИ

Для количественного описания различных свойств процессов и физических тел введено понятие величины. *Величина* – это свойство чего-либо, которое может быть выделено среди других свойств и оценено каким-либо способом (в том числе и количественно). Величина не существует сама по себе, она имеет место лишь постольку, поскольку существует объект со свойствами, выраженными данной величиной.

Все существующие величины можно разделить на две группы: величины материального вида (реальные) и величины идеальных моделей реальности (идеальные), которые относятся главным образом к математике и являются модельными представлениями реальных понятий.

Реальные величины можно разделить также на два вида: физические и нефизические. Физическая величина в самом общем случае определяется как величина, свойственная материальным объектам (процессам, явлениям), изучаемым в естественных и технических науках. К нефизическим относят величины, обычно используемые в общественных науках – социологии, экономике, педагогике и т. д.

В РМГ-29-99 [27] дается следующее понятие *физической величины*: «Это одно из свойств физического объекта, общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них». Последнее понимают в том смысле, что свойство может быть для одного объекта в определенное число раз больше или меньше, чем для другого, то есть физической величине данного объекта можно приписать индивидуальный уровень интенсивности. Необходимость в определении уровней интенсивности величин вызвала появление следующих понятий и связанных с ними терминов:

– *размер физической величины* – количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «физичес-

кая величина». Например, можно сказать, что масса одного объекта больше массы другого объекта в 5 раз;

– значение *физической величины* – выражение размера физической величины в виде числа принятых для этой ФВ единиц. Например, масса объекта 5 кг. В общем виде для значения ФВ можно записать выражение

$$X = x[X], \quad (2.1)$$

где X – измеряемая ФВ;

x – числовое значение ФВ (в данном примере это 5);

$[X]$ – единица ФВ (килограмм).

Выражение (2.1) в метрологии получило название *основного уравнения измерения*. *Измерение* – процесс сопоставления путем физического эксперимента измеряемой ФВ с известной ФВ, принятой за единицу измерения. Результатом измерения физической величины X является некоторое значение x в установленных единицах $[X]$. Этот результат, конечно же, зависит от выбранных единиц измерения. Так, длина одного и того же объекта может составлять 10 дюймов, или 25,4 сантиметра. Физическая величина длина остается одной и той же, но ее выражение зависит от выбранной единицы ФВ.

Метрология имеет дело только с физическими величинами. Их можно разделить на измеряемые и оцениваемые. Измеряемые выражаются количественно в виде определенного числа установленных единиц измерения в соответствии с выражением (2.1). Возможность введения и использования таких единиц является отличительным признаком измеряемых физических величин. Физические величины, для которых не может быть введена единица измерения, могут быть оценены. Оценивание – это операция приписывания данной величине определенного числа, которая проводится по установленным правилам. Оценивание величины производится при помощи шкал. Оценивают твердость минералов по шкале твердости Мооса (табл. 2.1) или силу землетрясений по шкале Рихтера.

Можно измерить силу сжатия образца бетона или арматуры при испытаниях, можно измерить размеры образцов, можно косвенно измерить напряжение в образце, характеристическую прочность бетона для массива образцов, но класс арматуры или класс бетона

по прочности выбирается из стандартного ряда (шкалы), то есть оценивается.

Таблица 2.1

Шкала твердости (шкала Мооса)

Твердость	Название минерала
1	Тальк
2	Гипс
3	Кальцит
4	Флюорит (плавиковый шпат)
5	Апатит
6	Ортоклаз (полевой шпат)
7	Кварц
8	Топаз
9	Корунд
10	Алмаз

Нефизические величины (например, уровень интеллекта в коэффициентах интеллекта IQ ; уровень знаний в баллах на экзамене и т. д.) могут быть только оценены, так как для них единицы измерения нет⁶;

– *единство измерений* – такое их состояние, при котором результаты измерений выражены в узаконенных единицах, а погрешности измерений известны с заданной вероятностью и не превышают установленных пределов;

⁶ Вопрос с физическими и нефизическими величинами не так прост, как может показаться на первый взгляд. Наверно, экзаменационная оценка есть результат «объединения» экзаменатором большого количества разнородных внутренне сложно-структурированных факторов, отображающих реакцию экзаменуемого на заданный вопрос. Существующий уровень наших знаний о мыслительных процессах еще не позволяет их формализовать до такой степени, чтобы описывать мыслительную деятельность экзаменуемого (и экзаменатора тоже) набором физических величин. В то же время можно предположить, что с помощью некоего гипотетического, достаточно совершенного томографа такие процессы можно будет когда-нибудь зарегистрировать и объективно измерить их величины, если не на уровне отдельных нейронов, то на уровне зон активности головного мозга, связанных с усвоением каких-либо знаний.

– *истинное значение физической величины* – это значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в количественном и качественном отношении соответствующую физическую величину, при тех условиях, при которых эту величину рассматривают⁷;

– *действительное значение физической величины* – значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

2.1. Система физических величин и единиц физических величин

Система ФВ – совокупность ФВ, образованная в соответствии с принятыми принципами: одни ФВ принимаются в качестве *основ-*

⁷ Одним из постулатов метрологии является положение о том, что истинное значение ФВ существует, однако определить его путем измерения невозможно. Истинное значение ФВ является идеализацией (упрощением) нашего представления о данном объекте. По мере изменения масштаба рассмотрения одного и того же объекта (процесса) происходит и изменение перечня ФВ, которые его характеризуют. Например, измеряя длину стержня, мы имеем дело лишь с одной физической величиной – его длиной. Пытаясь измерить длину более точно, можно шлифовать его торцы и контактные поверхности измерительного прибора. Но по мере улучшения качества поверхностей можно обнаружить, что дальнейшая шлифовка не приведет к росту точности, так как начнет проявлять себя «рыхлая» молекулярная структура материала. Возникнет вопрос: где у молекул, составляющих торец стержня (и щупов измерительного прибора), находится граница электронных оболочек, по которой будет определяться длина стержня? Для определения границ придется вводить новые критерии, учитывать другие физические величины, например, дополнительно измерять силовое взаимодействие измерительного прибора и стержня. Или использовать туннельный эффект – появление электрического тока между электродами при их сближении – так, как это делается в туннельном микроскопе (используемом в качестве инструмента в областях нанотехнологии). Кроме того, придется учитывать хаотическое движение молекул – длина стержня приобретает еще и вероятностный характер. Можно уверенно предположить, что даже указанные ухищрения не дадут окончательного «истинного» значения длины.

ных (независимых), а все остальные, получаемые с их использованием, – производных. На основе системы физических величин создают систему единиц ФВ (рис. 2.1)⁸.

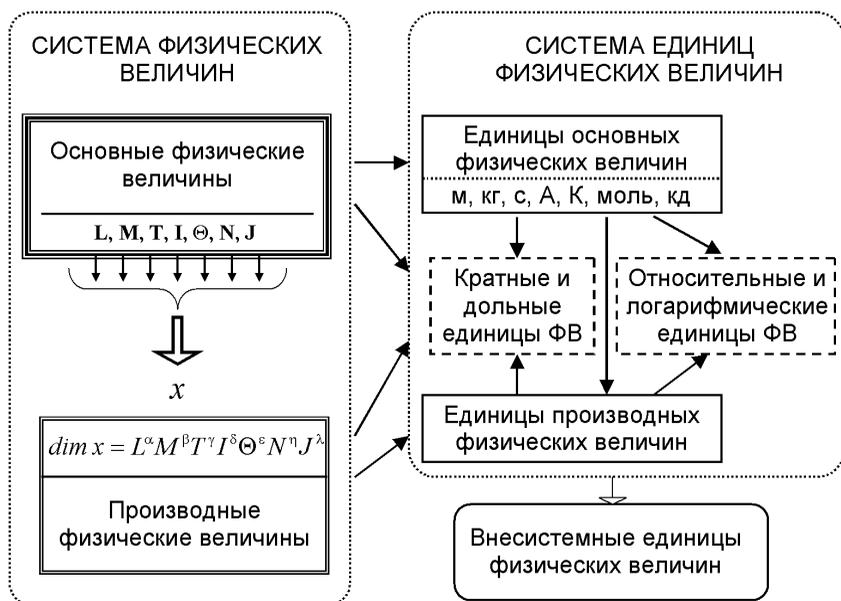


Рис. 2.1. Система физических величин и единиц физических величин

Выбор основных ФВ может производиться произвольно. Но, очевидно, что ни одна из них не должна быть выводима из остальных. Кроме того, рационально в качестве основных принимать величины, наиболее часто встречающиеся в уравнениях взаимосвязи, или те величины, для которых можно создать наиболее точную и

⁸ В 1832 г. немецкий математик К. Гаусс предложил методику построения системы единиц как совокупности основных и производных. Он построил систему единиц, в которой за основу были приняты три произвольные, независимые друг от друга единицы длины, массы и времени. Все остальные единицы можно было определить с помощью этих трех. Такую систему единиц, связанных определенным образом с тремя основными, Гаусс назвал *абсолютной системой*. За основные единицы он принял миллиметр, миллиграмм и секунду.

стабильную единицу⁹. Размер единицы ФВ устанавливается законодательно путем закрепления определения размера единицы метрологическими органами государства.

Основные единицы международной системы единиц (СИ) с указанием сокращенных обозначений русскими и латинскими буквами приведены в табл. 2.2. Сразу заметим, что принятая система ФВ и единиц ФВ далека от совершенства. В частности, единица моль сегодня не имеет эталона для ее воспроизведения, то есть является, по существу, расчетной. Силу света нельзя считать в строгом смысле независимой величиной, так как она характеризует мощность электромагнитного излучения, то есть является производной от величин длины, времени и массы. Выделение же в спектре электромагнитного излучения узкой полосы, соответствующей видимому свету, не придает этой ФВ нового качества.

Очевидным является преимущество использования в качестве эталонов единиц величин так называемых «естественных единиц». Например, единица длины является производной от «естественного эталона» – скорости света в вакууме и «естественного эталона» времени – периода электромагнитных колебаний излучения атома цезия.

⁹ Важным условием также является возможность материализации (воспроизведения) единицы ФВ. До 1960 г. эталоном метра являлся металлический профиль, длина которого предполагалась равной 1/10 000 000 четверти длины меридиана. К середине 20 в. точность воспроизведения единицы длины таким способом перестала удовлетворять требованиям науки и технологии. Отдельную проблему представляла собой процедура переноса этой единицы на так называемые рабочие эталоны. Современное определение метра как длины пути, проходимого светом в вакууме за 1/299 792 458 секунды, обеспечивает неуничтожимость единицы длины и ее воспроизведение с относительной погрешностью $2 \cdot 10^{-11}$.

Таблица 2.2

Основные единицы Международной системы единиц
физических величин

Физическая величина		Единица физической величины			
Наименование	размерность	наименование	обозначение		определение
			межд.	рус.	
1	2	3	4	5	6
Длина	L	метр	m	м	Метр есть длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени $1/299\,792\,458$ секунды (XVII Генеральная конференция по мерам и весам (ГКМВ), 1983 г.)
Масса	M	килограмм	kg	кг	Килограмм есть единица массы, равная массе международного прототипа килограмма <i>Le Grand K</i> (I ГКМВ, 1889 г. и III ГКМВ, 1901 г.)
Время	T	секунда	s	с	Секунда есть время, равное $9\,192\,631\,770$ периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 (XIII ГКМВ, 1967 г.)
Сила электрического тока	I	ампер	A	А	Ампер есть сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 метр один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 метр силу взаимодействия, равную 2×10^{-7} ньютон (IX ГКМВ, 1948 г.)

1	2	3	4	5	6
Термодинамическая температура	Θ	кельвин	К	К	Кельвин есть единица термодинамической температуры, равная $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды (XIII ГКМВ, 1967 г.)
Количество вещества	N	моль	mol	моль	Моль есть количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 килограмма – число Авогадро – $6,02214082 \times 10^{23}$. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц (XIV ГКМВ, 1971 г.)
Сила света	J	кандела	cd	кд	Кандела есть сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой 540×10^{12} герц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ ватт/стерадиан (XVI ГКМВ, 1979 г.)

Такие эталоны обладают свойством неуничтожимости¹⁰.

¹⁰ Эталон килограмма остался единственным уничтожимым эталоном. Ближайшей перспективой является создание естественного эталона единицы массы. Природный масштаб этой единицы очень мал, так как задается массой микрообъектов – атомов, молекул. Переход к массе макрообъекта осуществляется с помощью фундаментальной физической константы –

Производные единицы Международной системы единиц образуются с помощью простейших уравнений между величинами, в которых числовые коэффициенты равны единице. Так, для силы F в качестве определяющего уравнения можно воспользоваться выражением второго закона Ньютона

$$F = am. \quad (2.2)$$

Сила, обеспечивающая для массы в 1 кг ускорение в 1 м/с, имеет величину 1 Н (Ньютон).

Кратные и дольные единицы

Способом образования кратных и дольных единиц является принятая в метрической системе мер десятичная кратность между большими и меньшими единицами. В табл. 2.3 приводятся множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования.

числа Авогадро, значение которой пока известно не настолько точно, чтобы обеспечить воспроизведение единицы массы – килограмма – со стандартным отклонением порядка 10^{-8} кг. Предполагается создание эталона килограмма в виде сферы, вырезанной из монокристалла кремния ультравысокой чистоты, с обеспечением высокой точности сферической формы эталона. Упорядоченное расположение атомов кремния позволит подсчитать их количество в эталоне методами нанотехнологии, а сферическая форма образца делает его более устойчивым к механическим воздействиям при измерительных манипуляциях. Таким образом, эталон килограмма будет определяться через число Авогадро и массу атома кремния, то есть через «естественные единицы».

Кроме определения единицы массы, сегодня ведутся интенсивные исследования возможности замены существующих определений ампера, кельвина и моля на основе точных значений постоянных Планка, Авогадро, Больцмана и электрического заряда. В частности, рассматривается вопрос о переходе к новым определениям ряда основных единиц СИ, которые должны быть основаны на точных значениях фундаментальных физических констант (ФФК). Такой переход способствует повышению точности, стабильности и воспроизводимости результатов измерений в любом месте и в любое время. Это обусловлено тем, что единицы величин, определяемые с помощью ФФК, в принципе становятся независимыми от многих факторов, связанных с воздействием природных условий и человеческой деятельности.

Таблица 2.3

Множители и приставки для образования кратных
и дольных единиц SI

Множитель	Наименование		Обозначение	
	международное	русское	международное	русское
10^{24}	<i>yotta</i>	йотта	<i>Y</i>	И
10^{21}	<i>zetta</i>	зетта	<i>Z</i>	З
10^{18}	<i>exa</i>	экса	<i>E</i>	Э
10^{15}	<i>peta</i>	пета	<i>P</i>	П
10^{12}	<i>tera</i>	тера	<i>T</i>	Т
10^9	<i>giga</i>	гига	<i>G</i>	Г
10^6	<i>mega</i>	мега	<i>M</i>	М
10^3	<i>kilo</i>	кило	<i>k</i>	к
10^2	<i>hecto</i>	гекто	<i>h</i>	г
10^1	<i>deca</i>	дека	<i>da</i>	да
10^{-1}	<i>deci</i>	деци	<i>d</i>	д
10^{-2}	<i>centi</i>	санти	<i>c</i>	с
10^{-3}	<i>milli</i>	милли	<i>m</i>	м
10^{-6}	<i>micro</i>	микро	μ	мк
10^{-9}	<i>nano</i>	нано	<i>n</i>	н
10^{-12}	<i>pico</i>	пико	<i>p</i>	п
10^{-15}	<i>femto</i>	фемто	<i>f</i>	ф
10^{-18}	<i>atto</i>	атто	<i>a</i>	а
10^{-21}	<i>zepto</i>	зепто	<i>z</i>	з
10^{-24}	<i>yocto</i>	йокто	<i>y</i>	и

К «внесистемным» можно отнести единицы, которые не входят в выстроенную систему физических единиц величин, а также единицы, заимствованные из других систем и имеющие иные системы собственного построения: дюйм, фут, миля, калибр, карат, минута-час-сутки, градусы Цельсия; угловые градусы – минуты – секунды, тонна, световой год, парсек. Используют также внесистемные относительные, относительные логарифмические и условные единицы:

процент, промилле, единицы твердости, единицы светочувствительности фотоматериалов¹¹.

2.2. Алгебра размерностей

Качественной характеристикой измеряемых величин является их размерность. Формализованная размерность обозначается символом dim , происходящим от слова *dimension*, которое в зависимости от контекста может переводиться и как размер, и как размерность. Размерность основных физических величин обозначается соответствующими заглавными буквами. Для длины, массы и времени, например, $dim l = L$; $dim m = M$; $dim t = T$.

При определении размерности производных величин руководствуются следующими правилами:

1. Размерность производной физической величины всегда может быть выражена через размерности основных физических величин в форме степенного одночлена

$$dim X = L^{\alpha} \cdot M^{\beta} \cdot T^{\gamma} \cdot I^{\delta} \cdot \Theta^{\varepsilon} \cdot N^{\eta} \cdot J^{\varphi}, \quad (2.3)$$

где L, M, T, \dots – размерности основных физических величин;

$\alpha, \beta, \gamma, \dots$ – показатели размерности (могут быть любым вещественным числом).

2. Размерности левой и правой частей уравнений не могут не совпадать, так как сравниваться между собой могут только одинаковые свойства. Объединяя левые и правые части уравнения, можно прийти к выводу, что алгебраически суммироваться могут только величины, имеющие одинаковые размерности.

3. Алгебра размерности мультипликативна, то есть состоит из одного единственного действия – умножения:

¹¹ В ГОСТ 8.417 редакции 2002 г. представлены «единицы количества информации» бит и байт (1 байт равен 8 бит). Бит – единица информации в двоичной системе счисления, причем в соответствии со стандартом МЭК 60027–2 единицы «бит» и «байт» можно применять с приставками *SI*. Однако фактически в вычислительной технике при использовании двоичной системы счисления для кратных приставок используют не $10^3 = 1000$, а $2^{10} = 1024$, причем 1 Кбайт = 1024 байт, 1 Мбайт = 1024 Кбайт, 1 Гбайт = 1024 Мбайт. При этом приставку «кило», в отличие от установленного в *SI* обозначения строчной буквой, обозначают прописной (1 Кбайт = 1024 байт).

– размерность произведения нескольких величин равна произведению их размерностей. Так, если зависимость между величинами X, A, B, C имеет вид $X = ABC$, то $\dim X = \dim (ABC) = \dim A \times \dim B \cdot \dim C$;

– размерность частного при делении одной величины на другую равна отношению их размерностей, то есть если $X = A/B$, то $\dim X = \dim (A/B) = \dim A / \dim B$;

– размерность любой величины, возведенной в некоторую степень, равна ее размерности в той же степени. Так, если $X = A^n$, то $\dim X = \dim(A^n) = (\dim A)^n$.

Пример 1. Требуется образовать производные единицы скорости, силы, давления.

Решение:

1. Так как скорость определяется соотношением $V = S/t$, то $\dim V = \dim S / \dim t = L / T = LT^{-1}$.

2. Так как по второму закону Ньютона сила равна $F = ma$, где $a = V/t$ – ускорение тела, то $\dim F = \dim m \cdot \dim a = ML/T^2 = MLT^{-2}$. Если принять размерность массы – кг, длины – м, времени – с, то размерность силы $\dim F = \text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}$. Такая единица называется ньютоном (Н).

3. Давление p – отношение силы F к площади A воздействия, то есть $p = F/A$. Для размерностей можем записать $\dim p = \dim F / \dim A = MLT^{-2}/L^2 = ML^{-1}T^{-2}$.

Если все показатели размерности равны нулю, то такая величина называется безразмерной. Она может быть относительной, определяемой как отношение одноименных величин, например, коэффициент Пуассона, коэффициент вариации, относительная диэлектрическая проницаемость. Операция логарифмирования относительной величины приводит к образованию логарифмических безразмерных величин. *Октава* – логарифм по основанию 2 отношения двух величин (обычно используется в частотных измерениях в акустике и радиотехнике). *Бел* – обозначается как Б (или B – *лат*) – логарифм по основанию 10 отношения мощностей, также используется в акустике и радиотехнике¹².

¹² Если говорят, что диапазон певца составляет 3 октавы, то это значит, что верхняя частота его голоса в $2^3 = 8$ больше, чем самая низкая. В деци-

$$x [\text{Б}] = \lg(x/x_0).$$

Чаще, чем бел, используется его дольная величина – *децибел* (дБ, dB)

$$x [\text{дБ}] = 10 \lg(x/x_0).$$

Размерность отражает связь измеряемой величины с основными величинами и зависит от выбора последних. Как указывал М. Планк, вопрос «об истинной размерности любой величины имеет не более смысла, чем вопрос об истинном названии какого-либо предмета». Несмотря на указанную «вольность» в выборе размерностей величин, методами теории размерностей нередко удается получать важные самостоятельные результаты. Формальное применение алгебры размерностей иногда позволяет определить неизвестную зависимость между физическими величинами.

Пример 1. Маятник характеризуется двумя величинами: массой m и длиной l . Колебания маятника совершаются под действием силы тяжести, зависящей от ускорения свободного падения g . Следовательно, период колебаний τ может зависеть только от этих трех величин и является функцией вида

$$\tau = C m^\alpha l^\beta g^\gamma, \quad (2.4)$$

где C – безразмерный коэффициент, зависящий от выбора единиц величин.

Требуется определить вид этой зависимости.

белах часто выражают громкость звука. В этом случае величиной, характеризующей громкость звука, является звуковое давление. За 0 дБ громкости звука принимается порог слышимости, соответствующий давлению в $20 \cdot 10^{-6}$ Па в зоне измерения. Такое значение соответствует физиологическому порогу слышимости для человека. Использование логарифмической формы представления позволяет заменить операцию произведения величин операцией сложения их логарифмов – $\lg(AB) = \lg A + \lg B$, что облегчает анализ процессов, описываемых последовательностью перемножений или делений величин.

Решение. Запишем условие равенства размерностей левой и правой частей уравнения (2.4). Так как $\dim \tau = T$, $\dim m = M$, $\dim l = L$, $\dim g = LT^{-2}$, то

$$T = M^\alpha L^\beta (LT^{-2})^\gamma \quad \text{или} \quad T = M^\alpha L^{\beta+\gamma} T^{-2\gamma}. \quad (2.5)$$

Равенство размерностей левой и правой частей уравнения будет достигаться при условиях: $\alpha = 0$; $\beta + \gamma = 0$; $-2\gamma = 1$, откуда следует: $\alpha = 0$; $\beta = 1/2$; $\gamma = -1/2$. Подставив найденные значения показателей размерности в исходное уравнение (2.4), получим

$$\tau = C \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (2.6)$$

Пример 2. Определить зависимость скорости распространения продольной упругой волны c в тонком стержне сечением s , для которого известны модуль упругости E и плотность материала ρ .

Решение. В общем виде искомая зависимость будет иметь вид

$$c = CE^\alpha s^\beta \rho^\gamma. \quad (2.7)$$

Запишем условие равенства размерностей левой и правой частей уравнения (2.7). Так как $\dim c = LT^{-1}$, $\dim E = \dim F / \dim s = ML^{-1}T^{-2}$, $\dim s = L^2$, $\dim \rho = ML^{-3}$, то

$$LT^{-1} = (ML^{-1}T^{-2})^\alpha (L^2)^\beta (ML^{-3})^\gamma$$

или

$$LT^{-1} = M^\alpha L^{-1\alpha} T^{-2\alpha} L^{2\beta} M^\gamma L^{-3\gamma}. \quad (2.8)$$

Равенство размерностей левой и правой частей уравнения будет достигаться при условиях: $\alpha = 1/2$; $\beta = 0$; $\gamma = -1/2$. Подставив найденные значения показателей размерности в исходное уравнение (2.7), получим выражение для скорости волны с точностью до постоянно-го коэффициента C :

$$c = C \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (2.9)$$

Формула (2.9) совпадает с точностью до постоянного коэффициента C с так называемой «стержневой» скоростью акустической волны.

Составление уравнений (2.5) и (2.8) начиналось со схематизации – выделения тех величин, которые, по нашему мнению, характеризуют протекание рассматриваемого процесса. Для этого надо обладать определенной физической эрудицией и интуицией. Если просто вписать в эти уравнения все, что приходит в голову, допустим, параметры, описывающие форму маятника, молекулярную массу вещества, из которого он сделан, температуру, электрический заряд, напряженность магнитного поля земли и т. д., то, если какой-то результат и получится, вряд ли он будет иметь отношение к процессу колебаний механического маятника.

Ограниченность теории размерности проявляется и в том, что с ее помощью нельзя установить функциональные соотношения между безразмерными величинами. В уравнении (2.8) показатель степени β при размерности площади L^2 стержня оказался равным нулю, что можно трактовать как независимость скорости распространения акустической волны от площади сечения s . Это действительно так, но только при определенных условиях, а именно: диаметр стержня должен быть много меньше его длины, а длина волны колебаний должна быть больше диаметра стержня. В то же время решение дифференциальных уравнений, описывающих динамику механического движения частиц стержня большого сечения дает следующую формулу для скорости акустической волны:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)}}, \quad (2.10)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

В отличие от формулы (2.9), формула (2.10) содержит в явном виде влияния на скорость безразмерной величины – коэффициента Пуассона, но функциональная связь скорости от модуля упругости и плотности материала у них совпадает¹³.

¹³ Вывод зависимости скорости акустической волны в стержне от его диаметра представляет собой нетривиальную задачу. Здесь проявит себя и такой фактор, как способ измерения скорости, особенно это касается акустической волны в форме короткого по времени импульса.

Алгебра размерностей¹⁴ повсеместно применяется для оперативной проверки правильности сложных формул. Если размерности левой и правой частей уравнения не совпадают, то есть не выполняется правило 2, то в выводе формулы, к какой бы области она не относилась, следует искать ошибку.

Не следует представлять себе механизм использования алгебры размерностей как способ извлекать истину из «ничего» исключительно из умозрительных моделей реальных физических процессов. Получаемые выводы будут всегда ограничены рамками той теории, уравнения которой положены в основу системы физических величин. Эффекты релятивистской физики, скрытая масса, темная энергия и другие не могут быть получены из уравнений классической физики при любой их перетасовке и комбинировании. Для этого необходимо их уточнение или установление новых связей между физическими величинами, а, возможно, и введение новых физических величин. Уравнения Ньютона, Гука не позволят получить формулу для прочности материала, так как это свойство материала изначально не заложено в указанные уравнения. Но они позволяют (см. пример 2) обнаружить существование упругих волн и получить выражения для скорости их распространения.

2.3. Классификация измерений

В дополнение к приведенным выше определениям, *измерение* можно трактовать и как процесс преобразования информации (величин): в соответствии с основным уравнением измерения (2.1) измеряемая величина X преобразуется в числовое значение x величины. Процесс преобразования может быть простым, однократным, а может представлять собой совокупность преобразований. Одним из измерительных преобразований является процедура сравнения величин, одна из которых является эталоном, содержащим единицу величины.

При измерении длины стержня арматуры используемая рулетка фактически является эталоном, содержащим единицы длины. В этом случае процесс измерения состоит из операции сопоставления длины стержня арматуры и длины ленты рулетки. Процесс измерения

¹⁴ Более строгой формой алгебры размерностей является *теорема размерностей*, или, как ее еще называют, π -теорема [32].

температуры термометром выглядит иначе. Термометр не содержит эталона температуры, но он содержит эталоны длины – его шкалу. Здесь измерительный процесс состоит из двух этапов: первый – преобразование температуры в длину ртутного или спиртового столбика, второй – сопоставление его длины со шкалой длин градуированной в единицах температуры.

Возможны другие варианты и последовательности измерительных преобразований, которые могут быть положены в основу измерений, и которые могут служить классификационными признаками. Одна из распространенных схем классификации измерений приведена на рис. 2.2.

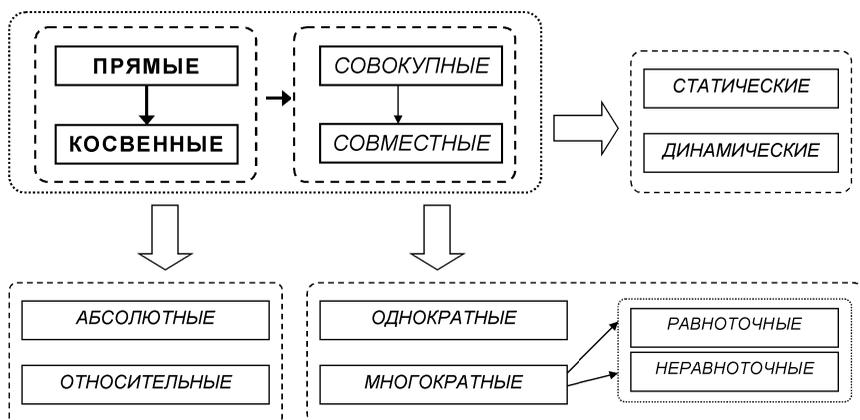


Рис. 2.2. Классификация измерений по видам

Прямые и косвенные измерения различают в зависимости от способа получения результата измерений. *Прямое измерение* – измерение, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно с устройства отображения (шкалы, дисплея) используемого средства измерения.

В качестве примера прямых измерений можно рассматривать измерение размеров рулеткой или штангенциркулем, углов с помощью нивелира или теодолита. К прямым измерениям следует отнести измерения давления газа манометром, силы тока амперметром, интервала времени секундомером.

Косвенное измерение – определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной.

При косвенных измерениях искомое значение величины Q рассчитывают на основании известной функциональной зависимости этой величины от величин, подвергаемых прямым измерениям.

$$Q = F(X, Y, \dots, Z), \quad (2.11)$$

где X, Y, \dots, Z – результаты прямых измерений.

Принципиальной особенностью косвенных измерений является обработка (преобразование) результатов вне прибора (вручную или автоматически с помощью компьютера). Характерным признаком таких измерений является процедура выбора косвенной зависимости (2.11). Имеется в виду подтверждение степени адекватности принятой идеализированной модели связи величин фактическим значениям искомой величины.

Примером косвенных измерений можно рассматривать измерение площади сечения S арматурного стержня круглого сечения (рис. 2.3).

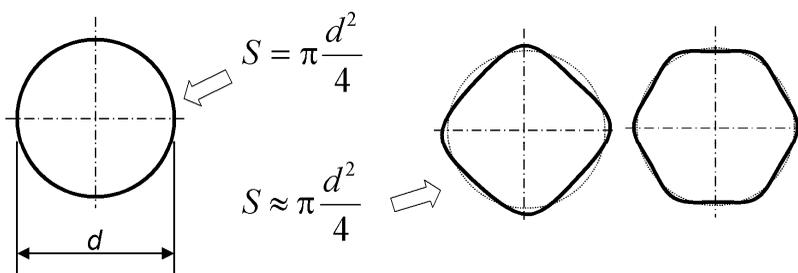


Рис. 2.3. Измерение площади круглого сечения стержня

Прямыми измерениями устанавливается величина диаметра d стержня, затем, используя известную формулу для площади круга, определяют площадь сечения. Расчетная формула взята из предположения, что сечение имеет форму круга. В реальности форма сечения арматурного стержня может иметь отклонения от идеального круга, что станет источником погрешности в определении площади.

Снижения погрешности можно достигнуть усложнением методики обработки данных, например, многократным повторением измерения диаметра стержня с его поворотом на каждом шаге измерений и последующим усреднением величины диаметра. Другой путь снижения погрешности – использование иной методики определения площади сечения, например, определив объем и длину фрагмента стержня. Объем, в свою очередь, можно определить, зная объемную массу арматурной стали и измерив массу фрагмента стержня.

Для арматурных стержней периодического профиля (рис. 2.4) известна формула [9] для расчета диаметра d равновеликого по площади круглого гладкого стержня

$$d = 12,74 \sqrt{\frac{m}{l}}, \quad (2.12)$$

где m – масса проката, г;
 l – длина проката, мм.

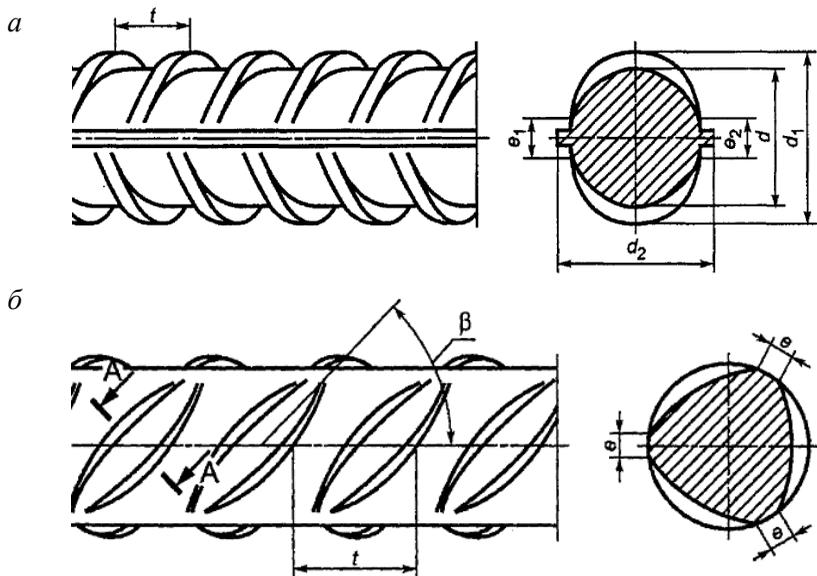


Рис. 2.4. Периодический профиль арматурного проката:
 а – горячекатаного; б – трехстороннего серповидного

Прямые и косвенные измерения характеризуют измерения некоторой конкретной одиночной физической величины. Часто решение задачи измерений связано с измерением некоторого множества физических величин. В этом случае классификационным признаком будет однородность (или неоднородность) измеряемых величин.

Совокупные измерения – проводимые одновременно измерения нескольких однородных (одноименных) величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях, например, определение значений массы отдельных гирь набора по известному значению массы одной из гирь и по результатам измерений (сравнений) масс различных сочетаний гирь. К совокупным измерениям можно отнести измерения координат объекта методом триангуляции (рис. 2.5).

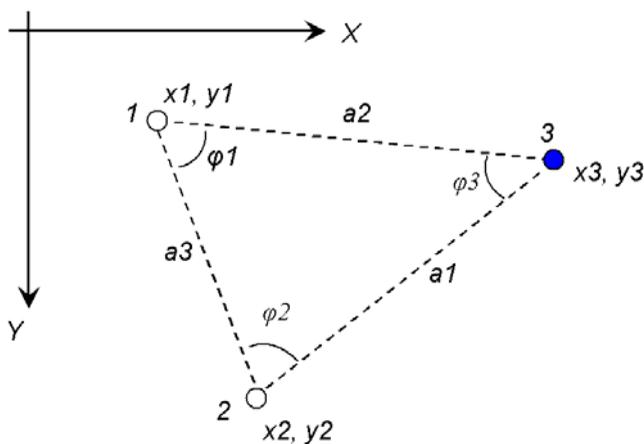


Рис. 2.5. Определение геодезических координат объекта

Известны (измерены) координаты точек 1 и 2, измерены углы φ_1 и φ_2 . Требуется определить для точки 3 ее координаты, которые прямыми измерениями получить невозможно, например, из-за расположения точки 3 в недоступном месте. Составим систему уравнений, описывающих взаимосвязь рассматриваемых точек, из которой можем определить координаты x_3 и y_3 , длины всех сторон треугольника.

$$\begin{cases} a3^2 = (x1 - x2)^2 + (y1 - y2)^2, \\ a2^2 = (x3 - x1)^2 + (y3 - y1)^2, \\ a1^2 = (x2 - x3)^2 + (y2 - y3)^2, \\ \frac{a1}{\sin \varphi1} = \frac{a2}{\sin \varphi2} = \frac{a3}{\sin \varphi3}. \end{cases} \quad (2.13)$$

Совместные измерения – проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними. Примером может служить установление градуировочной зависимости для неразрушающего метода испытаний строительных материалов. Типичная методика построения предполагает подготовку испытательных образцов с их последующим испытанием сначала неразрушающим методом, а затем – испытанием эталонным методом. Испытания каждого образца дают пару значений величин: значение косвенного параметра (например, скорости ультразвука в бетоне) и значение разрушающего напряжения при прессовых испытаниях образца бетона (рис. 2.6).

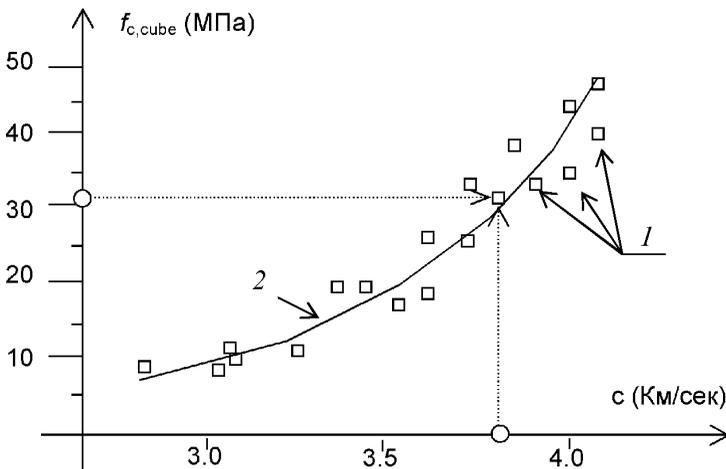


Рис. 2.6. Построение градуировочной зависимости «скорость УЗК – прочность бетона»:

1 – данные испытаний отдельных образцов; 2 – градуировочная зависимость

Результаты измерений могут отображаться в единицах измеряемой физической величины либо в относительных единицах. В соответствии с этим принято различать *абсолютные* и *относительные* измерения.

Абсолютное измерение – измерение, результаты которого отображаются в единицах измеряемой величины. При этом обычно под абсолютными измерениями понимают прямые измерения каких-либо величин. Например, для определения площади помещения измерены его ширина и длина; ширина составила 6 м, длина – 8 м, соответственно площадь будет равна 48 м².

Относительное измерение – измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы в данном измерении; либо измерение изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.

Пример 1. Измерение площади стены помещения для определения необходимого количества облицовочных плиток. Можно выполнить абсолютные измерения размеров стены, затем получить абсолютные значения длины и ширины облицовочной плитки. По этим показателям рассчитать необходимое количество плиток. А можно, не затрудняясь вычислениями, определить размеры стены, используя в качестве измерительного средства саму плитку. Результат измерений будет, разумеется, в «плитках».

Пример 2. Линейная деформация (удлинение–сжатие) несущих конструкций может быть представлена в абсолютных величинах длины – метрах, миллиметрах. Но больше информации о напряженно-деформированном состоянии конструкции будет содержаться в относительном показателе – его относительном удлинении $\varepsilon = \Delta l/l$. Зная относительное удлинение ε и модуль Юнга E , можно легко рассчитать напряжение σ в конструкционном материале:

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (2.14)$$

По числу повторных измерений одной и той же величины различают *однократные* и *многократные* измерения. *Однократное измерение* – измерение, выполненное один раз. *Многократные* измерения, как следует из их наименования, выполняются подряд несколько раз, например, с целью повышения точности результата. Многократное измерение состоит из однократных, но результат образуется

с учетом всего множества результатов однократных измерений, как правило, путем их усреднения.

Пример 1. Однократное измерение – измерение разрушающего напряжения в арматурном стержне в разрывной машине. Повторить его физически невозможно, так как испытуемый образец разрушен.

Пример 2. Многократное измерение – измерение прочности бетона молотком Кашкарова. Из-за неоднородности структуры бетона размеры отпечатков на поверхности испытуемой конструкции от каждого удара не будут совпадать. Делается несколько (много) измерений диаметров отпечатков, за окончательный результат принимается среднее значение диаметра. Сама процедура измерений прочности может быть повторена на других участках этой же конструкции. Оценка класса бетона по прочности будет получена путем статистической обработки множества значений прочности на участках.

При многократном повторении измерений одной и той же величины может сложиться ситуация, когда для части измерений обеспечивалась одна точность результата, а другая часть измерений была выполнена при другой точности. По реализованной точности и степени рассеяния результатов различают равноточные и неравноточные, а также равномерные и неравномерные измерения.

Равноточные измерения – ряд измерений какой-либо величины, каждое из которых выполнено одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях с одинаковой тщательностью.

Неравноточные измерения – ряд измерений какой-либо величины, выполненных различающимися по точности средствами измерений и (или) в разных условиях.

Пример измерения условного предела текучести арматурной стали путем испытаний на разрыв образцов. Часть образцов (одна серия) испытывалась на одной разрывной машине, другая серия – на другой машине, имевшей иные показатели точности. Метрологическая задача – определение общего результата измерений и его точности.

Статическое измерение – измерение физической величины, если она в течение времени измерения не изменяется. Абсолютно статических величин не бывает. В силу этого статическими можно считать такие измерения, при которых время регистрации (время измерения) будет пренебрежительно мало в сравнении с характерным временем изменения измеряемой величины.

Динамическое измерение – измерение изменяющейся по размеру физической величины, когда время измерительного процесса сопоставимо с характерным временем (например, периодом) изменения измеряемой величины.

Статическими можно считать измерения деформации несущих конструкций здания под действием снеговой нагрузки. Но измерения деформации конструкций моста, обусловленные их вибрацией из-за проходящего по мосту железнодорожного состава, будут динамическими¹⁵.

Смысл в разделении измерений на статические и динамические в том, что динамическим измерениям присущи дополнительные динамические погрешности, обусловленные отставанием реакции измерительного средства от фактических значений измеряемой величины.

3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Из-за несовершенства методов измерений, используемых средств измерений, нестабильности условий измерений и других причин результат каждого измерения величины отклоняется от истинного значения. Чем ближе результат измерения к истинному значению, тем более качественно выполнено измерение. Для количественного выражения качества проведенного измерения вводят понятие погрешности измерения. *Погрешность измерения* – это разница между результатом измерения x и истинным (в реальности действительным) значением $x_{и}$ (или $x_{д}$):

$$\Delta_x = x - x_{д}, \quad (3.1)$$

¹⁵ Из приведенных примеров можно сделать вывод, что разделение измерений на статические и динамические весьма условно и зависит от используемых измерительных средств. Если вибрации моста регистрировать механическим индикатором часового типа, то, безусловно, такие измерения следует считать динамическими, так как инерционность индикатора совместно с «инерцией» оператора может быть не только соизмеримой с периодом контролируемых колебаний моста, но и превосходить их. Если же измерения осуществлять с использованием тензорезисторов и электронных регистрирующих устройств, у которых время реакции может быть на несколько порядков меньше периода колебаний моста, то измерения можно считать статическими (или квазистатическими).

где Δ – обозначение *абсолютной погрешности* (это погрешность, выраженная в тех же единицах измерения, что и измеряемая величина).

Абсолютная погрешность позволяет судить о качестве данного результата. Если же возникает необходимость сопоставить качество измерений нескольких одноименных величин, то удобнее выражать погрешность в относительных единицах. *Относительная погрешность* δ – отношение абсолютной погрешности Δ к действительному значению физической величины x_d :

$$\delta_x = \Delta_x / x_d. \quad (3.2)$$

Относительная погрешность может выражаться в процентах. Поскольку на практике в большинстве случаев абсолютная погрешность Δ значительно меньше действительного значения x_d физической величины, то $x \approx x_d$ ¹⁶. В этом случае выражение для относительной погрешности примет вид

$$\delta_x \approx \Delta_x / x. \quad (3.3)$$

Пример. Сторона сечения железобетонной сваи измерена с погрешностью 2 мм и составила 20 см. Длина сваи измерена с погрешностью 10 мм и составила 6 м. Вопрос: для какого из показателей качество измерения оказалось выше?

Решение. В качестве критерия качества измерений возьмем значение относительной погрешности. Для стороны сечения абсолютная погрешность δ_1 составила $2/200 = 0,01$, что составляет 1 %. Для длины сваи абсолютная погрешность δ_2 составила $10/6000 \approx 0,0017$, что составляет 0,17 %. Таким образом, по показателю относитель-

¹⁶ Такой подход имеет смысл только при использовании абсолютных шкал единиц величин, когда 0 соответствует минимально возможному значению величины, а все остальные значения положительны. Например, нельзя таким образом сопоставлять относительные погрешности измерения температуры, используя шкалу Цельсия, так как чем ближе результат измерения к 0 °С, тем большей будет относительная погрешность. В этом случае для оценки погрешности термометра целесообразно использовать либо величину абсолютной погрешности, либо величину приведенной погрешности (см. ниже).

ной погрешности качество измерения длины сваи оказалось выше, чем для стороны сечения.

Погрешность является важной характеристикой измерений. Она должна быть определена обязательно, поскольку результат измерения без указания оценки его погрешности не имеет практической ценности.

3.1. Виды погрешностей

Классифицировать погрешности можно по разным признакам, в частности, так, как показано в табл. 3.1.

Определения абсолютной и относительной погрешностей рассмотрены выше.

Таблица 3.1

Классификация погрешностей измерений

Признаки классификации погрешностей измерений	Наименование погрешностей
По форме выражения	1. Абсолютные 2. Относительные 3. Приведенные
По причине возникновения	1. Инструментальные 2. Методические 3. Дополнительные (субъективные)
По характеру проявления	1. Систематические 2. Случайные 3. Промахи
По зависимости от измеряемой величины	1. Независимые (аддитивные) 2. Зависимые (мультипликативные) 3. Дополнительные

Приведенная погрешность – понятие, обычно применяемое в качестве характеристики средства измерения. Она определяется по формуле

$$\gamma_x = \Delta_x / x_N, \quad (3.4)$$

где x_N – значение измеряемой величины, условно принятое за нормированное. Часто в качестве x_N принимается разность между верхним и нижним пределами диапазона измерений: $x_N = x_{\max} - x_{\min}$.

Инструментальная погрешность – составляющая общей погрешности, обусловленная несовершенством применяемого СИ, например, отличием реальной функции преобразования прибора от его калибровочной. При длительном пользовании рулеткой ее стальная лента растягивается неравномерно – начальная часть ленты, которая чаще находится в работе, растягивается сильнее, чем та часть, которая соответствует большим длинам. В результате цена деления начальной части ленты уменьшается, что приводит к занижению результата измерения.

Инструментальная погрешность может быть также обусловлена запаздыванием динамических процессов в измерительном приборе по отношению к изменениям измеряемой величины.

Методическая погрешность измерений – составляющая погрешности измерений, обусловленная в основном несовершенством модели измеряемой величины. Это могут быть погрешности, обусловленные отличием принятой модели объекта измерения от реального объекта (см. рис. 2.3), неточностью формул, применяемых для нахождения результата измерений. При измерении влажности древесины диэлектрическим методом¹⁷ высокая точность результата может быть получена при использовании «своей» градуировочной зависимости для каждого вида древесины: дуба, сосны, клена и др. Использование некой усредненной градуировочной зависимости, например, с целью упрощения пользования прибором, приведет к появлению методической погрешности.

¹⁷ Физической основой диэлектрического метода измерения влажности по ГОСТ 21718-84 [5] является зависимость диэлектрической проницаемости $\epsilon\epsilon_0$ материала от его влагосодержания. Для большинства «сухих» строительных материалов, в том числе и для древесины, относительная диэлектрическая проницаемость ϵ лежит в пределах нескольких единиц – 2–6. Этот же показатель для химически несвязанной воды достигает значения 81. Поэтому даже небольшое содержание воды в материале приводит к значительному увеличению его диэлектрической проницаемости. Конструкция датчика влажности обычно представляет собой электрический конденсатор – два (или несколько) разнесенных электродов, пространство между которыми заполняется контролируемым материалом. При измерении влажности материалов следует учитывать температуру, так как диэлектрическая проницаемость воды зависит от температуры, что также может стать причиной погрешности.

Дополнительная (субъективная) погрешность – составляющая погрешности, связанная с несовершенством оценивания результатов измерений. В простейшем случае – это ошибки оператора при отсчете показаний по шкале средства измерения. К дополнительной можно отнести погрешность, обусловленную неучетом изменения факторов, влияющих на результат измерений. Например, производить рулеткой измерения расстояния между колоннами каркаса здания при сильном ветре или игнорировать провисание измерительной ленты рулетки.

Смысл разделения погрешностей на *независимые (аддитивные)* и *зависимые* в том, что оно позволяет получить более адекватные реальности модели для определения общей погрешности измерений. При измерении веса на рычажных весах независимая (аддитивная) погрешность может возникнуть, если к одной из чаш весов будет прикреплен дополнительный груз. Погрешность Δ_x будет оставаться постоянной независимо от измеряемого веса, при этом она будет всегда либо суммироваться с измеряемым весом, либо вычитаться из него. Относительная же погрешность δ_x будет тем меньше, чем большим будет измеряемый вес.

Зависимая (в данном примере – мультипликативная) погрешность может возникнуть при нарушении соотношения плеч рычажных весов. В этом случае абсолютная погрешность Δ_x в определении веса будет прямо пропорциональна величине веса. Относительная погрешность δ_x будет оставаться постоянной. Такое разделение погрешностей целесообразно принимать во внимание при определении общей (суммарной) погрешности результатов измерений и средств измерений.

3.2. Систематические погрешности

Систематическая погрешность измерения – составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или же закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины. Систематическую погрешность Δ_c можно обнаружить, например, путем сравнения результата измерения с результатом, полученным с помощью более точных средств измерений. Причинами возникновения систематических погрешностей являются инструментальные

погрешности средств измерения, погрешности, возникающие вследствие внешних влияний, погрешности, вызванные недостатками моделей измерений, субъективные систематические погрешности. По характеру проявления систематические погрешности можно разделить на постоянные и переменные. Переменные, в свою очередь, бывают возрастающими или убывающими, периодическими и изменяющимися по сложному закону.

Если систематическая погрешность определена, то она всегда может быть учтена (исключена) путем введения поправки. Поправка $\Delta_{\text{попр}}$ принимается равной систематической погрешности, взятой с противоположным знаком. Уточненный результат измерения с учетом поправки будет определяться по формуле

$$x = x_{\text{изм}} + \Delta_{\text{попр}} = x_{\text{изм}} - \Delta_{\text{с}}. \quad (3.5)$$

Исключение систематических погрешностей измерения, как отдельных результатов измерений, так и серий результатов, полученных при многократных измерениях одной и той же ФВ, называют «исправлением результатов», а сами результаты – *исправленными*. Однако полностью исключить систематическую погрешность, даже после введения поправок, практически невозможно хотя бы потому, что систематическая погрешность известна не с абсолютной точностью. Какая-то ее небольшая часть остается и в исправленном (после введения поправок) результате измерений. Кроме того, какая-то составляющая систематической погрешности может остаться невыявленной, например, по причине неполного (или неточного) знания влияющих на измеряемую величину факторов. Эти остатки называются *неисключенной систематической погрешностью* (НСП).

НСП – погрешность измерений, обусловленная погрешностями принятой модели измерения, погрешностями вычисления и введения поправок или же систематической погрешностью, на действие которой поправка не введена из-за предположения ее малости (в сравнении со случайной погрешностью). *Неисключенные остатки* систематических погрешностей присутствуют при любом, самом тщательном, выявлении систематических погрешностей¹⁸.

¹⁸ Неисключенная систематическая погрешность учитывается при расчете суммарной погрешности измерения наравне со случайной погреш-

Выявление и устранение систематических погрешностей

Выявление и уменьшение систематических погрешностей измерений является важнейшей задачей метрологии. Для ее решения разработаны различные способы. Например, с целью исключения систематической погрешности измерения, обусловленной нестабильностью функции преобразования измерительного прибора, периодически производят его калибровку по эталонным мерам (стандартным образцам). Иллюстрацией данного способа является подготовка прибора неразрушающего метода определения прочности бетона методом ударного импульса или упругого отскока (см. тему 8). Механический износ элементов прибора, изменение характеристик упругости ударной пружины приводит к изменению энергии удара индентора, что отразится на точности измерений. Поэтому, перед выполнением измерений прибором, рекомендуется выполнить несколько измерений на калибровочном стандартном образце. Для приборов метода ударного импульса в качестве стандартного образца используется образец из органического стекла, которое по прочностным показателям близко к конструкционному бетону. Если данные измерений на стандартном образце укладываются в установленные пределы, то считается, что прибор готов к эксплуатации. Если результаты калибровочных измерений выходят за установленные пределы, то необходимо скорректировать градуировочную зависимость прибора, то есть ввести поправку.

Экспериментальным способом уменьшения систематических погрешностей является способ смены знака погрешности или измеряемой величины. Он заключается в том, что измерения производятся дважды, при этом второе измерение выполняют так, чтобы влияние систематической погрешности (если она присутствует) на результат измерения было бы другого знака.

Пример. Выполняются измерения горизонтальности (угла наклона) поверхности строительной конструкции (рис. 3.1). Требуется определить систематическую погрешность уровня и «правильное» значение угла наклона контролируемой поверхности.

ностью. Для НСП закон ее распределения принимается равномерным, если нет какой-либо информации об ином его характере.

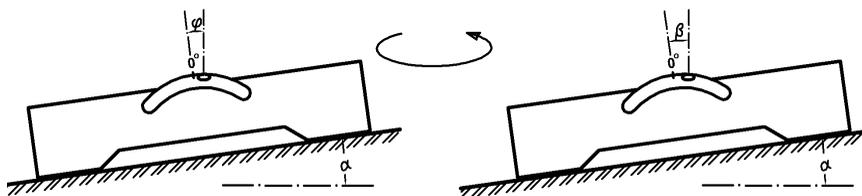


Рис. 3.1. Выявление систематической погрешности пузырькового уровня

Решение. По результатам первого измерения получено значение угла наклона φ . Затем уровень был развернут в горизонтальной плоскости на 180° . По результатам второго измерения угол наклона составил β . Систематическая погрешность измерения угла уровнем может быть обусловлена либо искривлением рейки уровня, либо смещением пузырьковой колбы. В обоих случаях погрешность будет аддитивной; в первом измерении показания прибора будут включать ее со знаком «+», во втором – со знаком «-», что можно записать следующим образом:

$$\varphi = \alpha + \Delta_c; \quad \beta = \alpha - \Delta_c.$$

Система двух уравнений с двумя неизвестными α и Δ_c однозначно разрешима:

$$\alpha = (\varphi + \beta)/2; \quad \Delta_c = (\varphi - \beta)/2.$$

Таким образом, среднее значение показаний уровня не будет содержать систематической погрешности.

3.3. Случайная погрешность

Случайная погрешность измерения – составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях одной и той же величины. Случайная составляющая погрешности вызывает рассеяние результатов измерений, которое носит вероятностный характер. Причины случайных

погрешностей многообразны: это вариации условий измерений¹⁹, в чувствительных электронных измерительных приборах – это электрические шумы электронных компонентов и сигналов, у механических устройств – проявления люфтов, трения, загрязнений. Случайный характер имеют погрешности, возникающие при оцифровке сигналов, так называемые шумы дискретизации при преобразовании аналоговых сигналов в цифровой код. Случайный характер также имеют ошибки округления при обработке данных, независимо от того, производится обработка данных вручную или на компьютерной основе. В отличие от систематических, случайные погрешности нельзя исключить из результатов измерений путем введения поправок, однако их влияние можно существенно уменьшить проведением повторных многократных измерений.

С классических теоретических позиций можно предположить, что случайный характер перечисленных выше факторов есть следствие нашего неполного, приблизительного представления о них. Достаточно тщательно измерить все указанные факторы: люфты, трение, помехи электрического сигнала и т. д., и они перейдут из разряда случайных погрешностей в разряд систематических погрешностей, а значит – устранимых. На первый взгляд это выглядит правдоподобным. В реальности же столь высокая точность определения этих «неслучайных» факторов может потребовать либо значительных затрат, либо будет просто недостижима при современном уровне техники. Более того, существует класс некоторых макропроцессов, которые при любой конечной точности их описания проявляют стохастический характер [31].

¹⁹ Имеется в виду неточная воспроизводимость условий измерений при их повторении. Примером может служить процесс прессовых испытаний бетонных образцов – кубов или призм для определения прочности бетона по ГОСТ 10180. Даже для образцов одинакового размера и из одного и того же состава бетона разрушающая нагрузка будет иметь заметный разброс значений. Причина разброса – множество факторов, практически неподдающихся учету и влияющих на результат измерений. К таковым факторам относится, в первую очередь, структурная неоднородность бетона: невозможно точно повторить размер, форму, свойства и местоположение зерен крупного заполнителя в массиве образца. Именно на границе зерен заполнителя образуются так называемые концентраторы напряжения, с которых начинается развитие трещин и, в итоге, разрушение образца.

Метрологическая проблема повышения точности измерений имеет физическую основу. Измерение любой физической величины связано с обменом энергией между измеряемым объектом и измерительным средством. Поэтому результат измерения является характеристикой не измеряемого объекта, а системы – измеряемый объект и измерительное средство. Это означает, что измерение ФВ невозможно без ее искажения самим процессом измерения. Это искажение можно минимизировать, но никогда оно не станет равным нулю. Здесь уместно вспомнить принцип неопределенности Гейзенберга: чем точнее удастся измерить координаты элементарной частицы, тем более неопределенными становятся ее импульс и энергия. Поэтому «окончательный» ответ на вопрос, существует ли вероятность какого-либо события, как проявление объективных законов природы, или она, как уже упоминалось, является лишь отображением наших «некачественных» знаний о данном событии оставим для других дисциплин. Для решения практических измерительных задач будет удобным считать случайными даже те влияющие на результат измерений факторы, которые при использовании более затратных средств и методов можно было бы детерминировать.

Из приведенных рассуждений следует: четкой границы между систематическими и случайными погрешностями нет и рассмотренная классификация погрешностей в значительной мере условна. Подтверждением справедливости данного утверждения является также существование такого понятия, как упомянутая выше неисключенная систематическая погрешность, которая по своему названию является систематической, а в общую погрешность измерения она входит наравне со случайными погрешностями. На рис. 3.2 показано участие различных типов погрешностей в результате измерения и оценке его неопределенности.

Таким образом, общая погрешность измерения будет включать в себя систематическую и случайную составляющие (рис. 3.3).

Вероятностное описание результатов измерений. Доверительная вероятность; доверительный интервал

Поскольку в процессе измерения истинное или действительное значение величины нам не известно – в противном случае отпадает необходимость в измерениях – то и погрешность, определенная по формулам (3.1)–(3.3), также будет неизвестной, и судить о ней мы

сможем только со значительной степенью неопределенности. Теория вероятностей и математическая статистика предлагают вероятностный подход к определению погрешностей измерений. В инженерной практике случайную составляющую погрешности и общую погрешность измерений выражают доверительным интервалом (см. рис. 3.3). *Доверительный интервал* – интервал значений ФВ, который с выбранной *доверительной вероятностью* P_d накрывает истинное значение измеряемой величины.

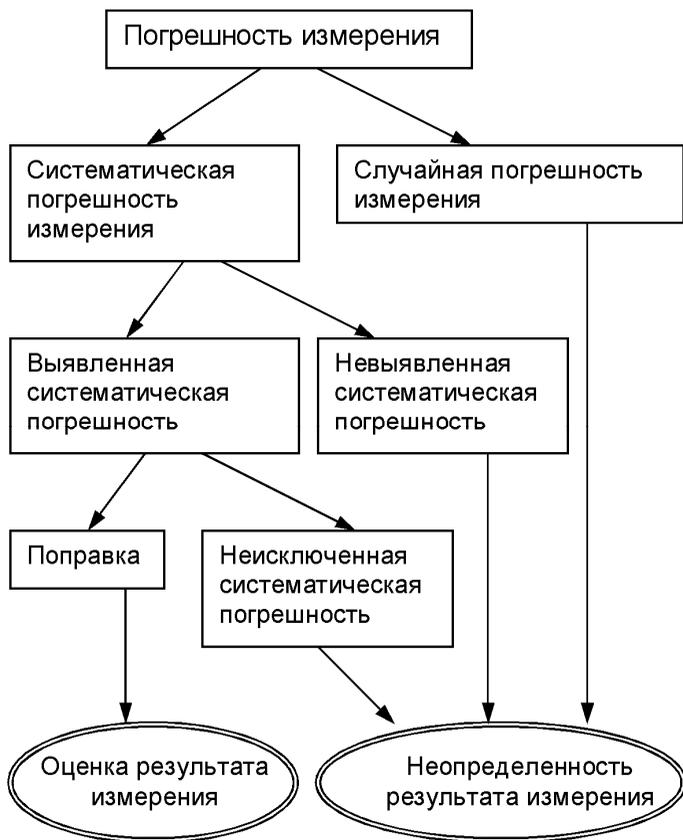


Рис. 3.2. Схема влияния различных типов погрешностей измерений на результат измерений и оценку его неопределенности

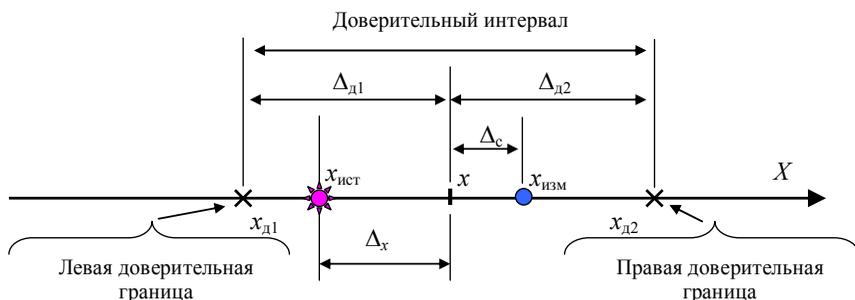


Рис. 3.3. Погрешности и доверительный интервал величины:
 x – точечная оценка результата измерения; $x_{\text{и}}$ – измеренное значение величины X ;
 $x_{\text{ист}}$ – истинное (действительное) значение величины X ; Δ_x – абсолютная погрешность измерения величины X ; Δ_c – систематическая погрешность измерения величины X ; $\Delta_{д1}$, $\Delta_{д2}$ – левая и правая составляющие доверительного интервала

Законы распределения вероятностей случайной величины. Нормальный закон распределения

Как уже указывалось, случайные погрешности проявляют себя при многократных измерениях. Для описания случайной величины, а таковой будет являться случайная погрешность, в теории вероятностей используется закон распределения плотностей вероятности случайной величины, в соответствии с которым случайная величина характеризуется несколькими детерминированными параметрами. Получить закон распределения плотностей вероятности случайной величины можно только на основе *генеральной совокупности* случайной величины²⁰. Приблизительное представление о законе распределения можно получить, используя часть генеральной совокупности – *выборку*, в которой проявляются закономерности, присущие генеральной совокупности.

Во многих практических случаях закон распределения плотностей вероятности случайной величины принимается априори (без проверки) из перечня некоторых наиболее распространенных. К таким относятся: нормальный закон распределения (Гаусса), равномерный и треугольный законы распределения, законы распределения Пуас-

²⁰ Генеральная совокупность – совокупность всех значений случайной величины. В большинстве практических случаев ее получить невозможно, так как она будет представлять собой бесконечное множество значений.

сона, Пирсона, Бернулли, экспоненциальный и некоторые другие законы распределения²¹.

Для наглядного отображения поведения исследуемой случайной величины, представленной выборкой своих значений, строят график – *гистограмму* или *полигон частот*, по которым можно ориентировочно определить эмпирический закон распределения и его основные параметры.

Рассмотрим пример построения гистограммы на примере обработки данных испытаний на разрыв партии образцов стальной арматуры. Испытано на разрыв 60 образцов арматурной стали; для каждого образца определен условный предел текучести $R_i = \sigma_{0,2}$. Все значения полученного вариационного ряда попали в интервал от $R_{\min} = 1040$ МПа до $R_{\max} = 1250$ МПа.

1. Производится ранжирование вариационного ряда размером n по возрастанию – все результаты располагаются последовательно по мере их возрастания; первым будет значение 1040 МПа, последним – 1250 МПа.

2. Определяется количество интервалов гистограммы (карманов) k .

Существуют разные рекомендации для определения k . Некоторые из них носят эвристический характер, иные имеют теоретическое обоснование. Известно эмпирическое правило (формула) Стерджеса

$$k \geq 1 + \log_2 n = 1 + 3,322 \lg n, \quad (3.6)$$

правило Райс

$$k = 2\sqrt[3]{N}.$$

Часто используют следующую формулу для расчета k :

$$k = \sqrt{n}, \quad (3.7)$$

где n – размер вариационного ряда, в примере $n = 60$.

²¹ Существуют статистические способы проверки соответствия выбранного эмпирического закона распределения и имеющихся экспериментальных данных измерений, в частности, по критерию Пирсона [4] и критерию Колмогорова.

Используя формулу (3.6), получаем $k = 7,75$; по формуле (3.7) $k = 6,9$. Примем компромиссный вариант – $k = 7$.

3. Рассчитывается размер интервала (кармана) h :

$$h = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{k} = \frac{1250 - 1040}{7} = 30 \text{ МПа.} \quad (3.8)$$

4. Рассчитывается заполнение интервалов (карманов) n_j , подсчитывается количество значений вариационного ряда, попавших в соответствующий интервал. Значения, оказавшиеся на границе смежных интервалов, включают в левый интервал.

5. Рассчитывается относительная частота значений ω_k и плотность распределения событий P_k :

$$\omega_j = \frac{n_j}{n}, \quad P_j = \frac{\omega_j}{h}. \quad (3.9)$$

В табл. 3.2 приведены данные примера расчетов параметров гистограммы, на рис. 3.4 по этим данным построена гистограмма. Высота прямоугольников гистограммы принимают равной плотности распределения событий (или относительной частоте), ширина основания – размеру интервала. Площадь Φ фигуры, образованной гистограммой, равна сумме площадей каждого прямоугольника:

$$\Phi = \sum_{j=1}^k (P_j h) = \sum_{j=1}^k \omega_j = 1. \quad (3.10)$$

Таблица 3.2

Пример расчетных данных для построения гистограммы

№	Интервал, МПа	Число значений в интервале n_j	Относительная частота $\omega_j = n_j/n$	Плотность распределения событий $P_j = (\omega_j/h) \cdot 10^3$
1	2	3	4	5
1	1040–1070	1	0,0167	0,557
2	1070–1100	4	0,067	2,233

1	2	3	4	5
3	1100–1130	9	0,15	5,000
4	1130–1160	15	0,25	8,333
6	1160–1190	16	0,267	8,900
6	1190–1220	10	0,167	5,567
7	1220–1250	5	0,083	2,766
		$\sum n_j = n = 60$	$\sum \omega_j = 1$	

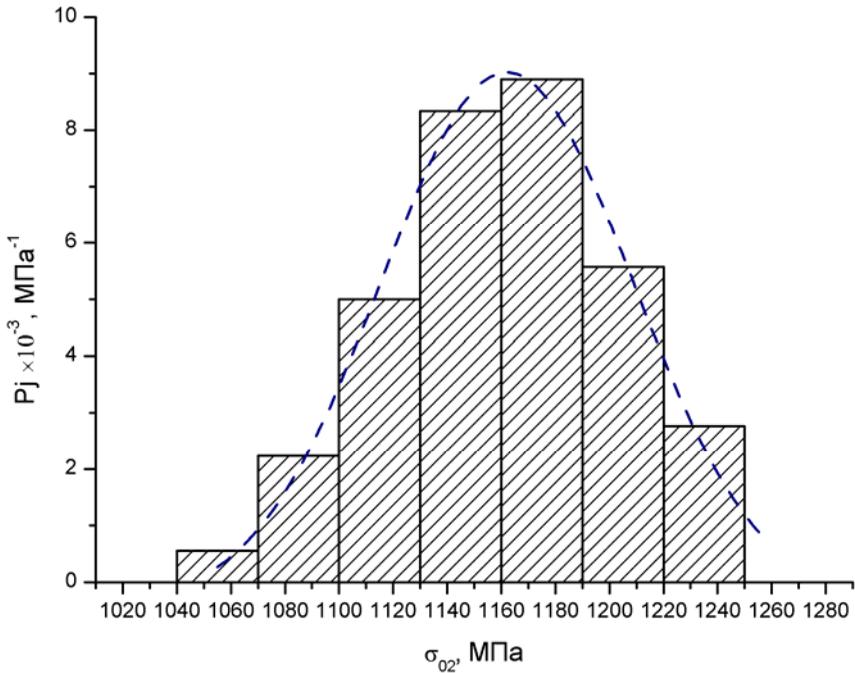


Рис. 3.4. Гистограмма распределения значений условного предела текучести стали (штриховой линией показан график «эквивалентного» нормального закона распределения)

Если увеличивать размер n вариационного ряда, то размер карманов h гистограммы будет стремиться к нулю, а количество карманов k – к бесконечности. «Ступени» гистограммы будут стано-

вителься все более мелкими, и в пределе график гистограммы примет вид гладкой кривой, отображающей дифференциальный закон распределения $f(x)$ плотности вероятности анализируемой величины X . Площадь фигуры Φ , ограничиваемой сверху указанной кривой, а снизу осью абсцисс, рассчитываемая по формуле

$$\Phi = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1, \quad (3.11)$$

будет равна вероятности появления любого значения величины, то есть – единице.

Интегрирование функции распределения в пределах аргумента от x_1 до x_2 дает значения вероятности попадания величины x в указанный интервал, значение доверительной вероятности для доверительного интервала $x_1 \dots x_2$:

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x)dx = P_{\left| \begin{smallmatrix} x_2 \\ x_1 \end{smallmatrix} \right.}. \quad (3.12)$$

Если какую-либо случайную величину x можно рассматривать как сумму большого числа других случайных величин, каждая из которых вносит в сумму небольшой вклад, то независимо от того, какому закону распределения подчиняются отдельные слагаемые x_i , их сумма будет иметь распределение, близкое к нормальному, описываемому формулой Гаусса²²:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_m}{\sigma}\right)^2}. \quad (3.13)$$

Как видно из формулы (3.13), нормальный закон распределения плотности вероятности случайной величины имеет два детерминированных параметра: x_m – математическое ожидание величины X , и σ – среднее квадратическое отклонение (СКО) величины X . График функции нормального распределения (рис. 3.5) симметричен относительно оси, проходящей через ее максимум, для аргумента

²² Приведенная формулировка получила название центральной предельной теоремы.

$x = x_m$. Точкам перегиба скатов функции соответствуют значения аргумента $\langle x_m - \sigma \rangle$ и $\langle x_m + \sigma \rangle$.

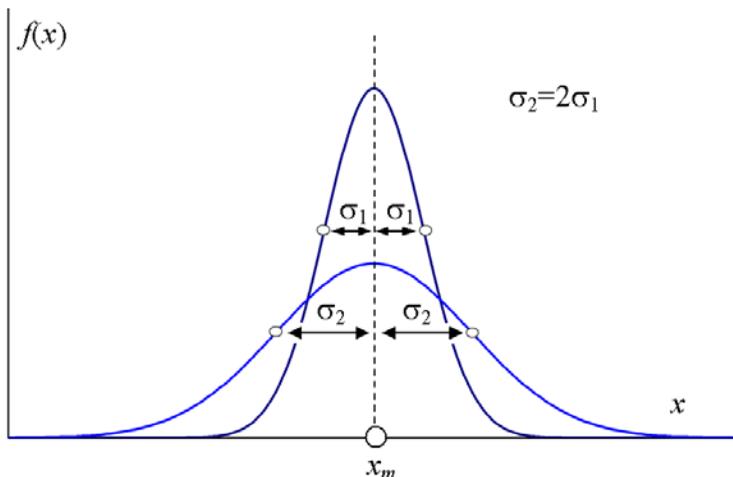


Рис. 3.5. Характерный вид графиков функций дифференциальной формы нормального закона распределения плотности вероятности величины x

В метрологической практике применяется функция $F(x)$ интегральной формы нормального закона распределения, описываемая соотношением

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_m}{\sigma}\right)^2} dx. \quad (3.14)$$

Характерный вид графиков функции интегральной формы нормального закона распределения плотности вероятности приведен на рис. 3.6.

Функцию закона распределения плотности вероятности удобнее анализировать в безразмерном виде. Для этого все размерные величины, входящие в формулу (3.12), выразим в единицах σ , то есть

$$\frac{(x - x_m) / \sigma}{\sigma / \sigma} = \frac{\Delta x}{\sigma} = t. \quad (3.15)$$

Нормальный закон распределения приобретает вид

$$\varphi(t) = \frac{1}{(\sigma\sqrt{2\pi})/\sigma} e^{-\frac{t^2}{2}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}. \quad (3.16)$$

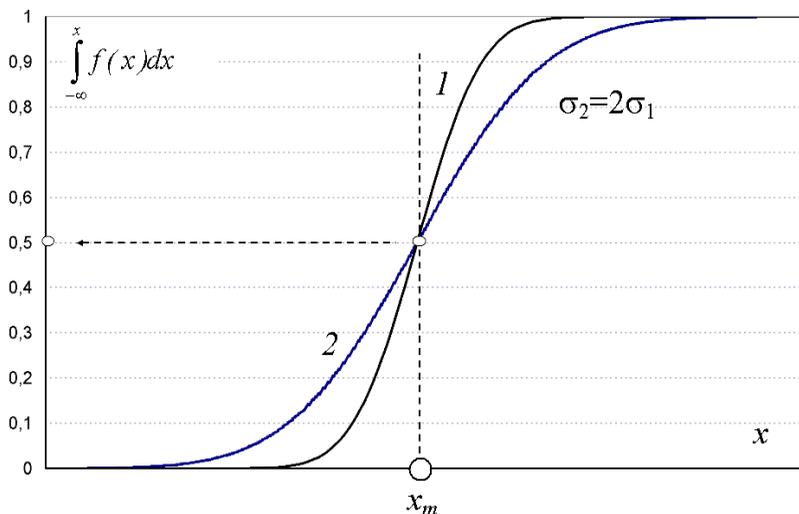


Рис. 3.6. Графики функций интегральной формы нормального закона распределения плотности вероятности величины x

Рассмотрим два важных для практики измерений случая определения доверительной вероятности: для симметричного доверительного интервала (рис. 3.7, а) и для несимметричного (одностороннего) доверительного интервала (рис. 3.7, б).

В первом случае $t_{д2} = -t_{д1}$. Доверительная вероятность P_d для данного доверительного интервала будет отображаться на рис. 3.7, а площадью, ограниченной кривой функции $\varphi(t)$, осью аргумента t и границами доверительного интервала. Симметрия графика функции $\varphi(t)$ и границ доверительного интервала делает справедливыми соотношения

$$P_d = \int_{t_{д1}}^{t_{д2}} \varphi(t) dt = 2 \int_0^{t_{д2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 2\Phi(t_{д2}), \quad (3.17)$$

где $\Phi(t_d)$ – интеграл вероятностей;
 t_d – коэффициент доверия.

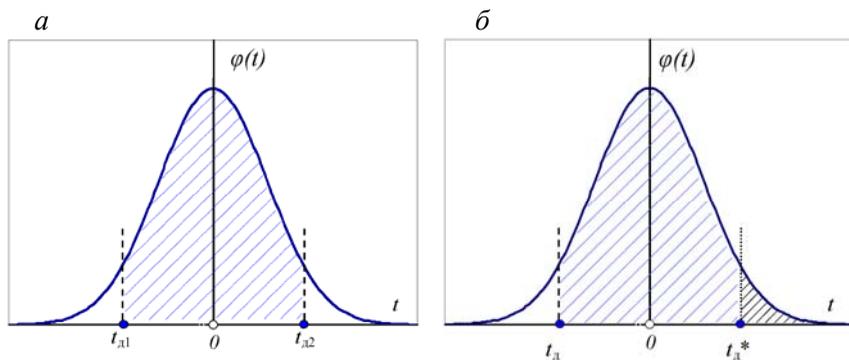


Рис. 3.7. Графическое представление симметричного (а) и несимметричного (б) доверительных интервалов

Левая и правая части Δ_d доверительного интервала в единицах величины x определяются по формуле

$$\Delta_d = t_d \sigma . \tag{3.18}$$

Интеграл вероятностей $\Phi(t)$ не может быть выражен через элементарные функции. Его значения, полученные численными методами, приводятся в математических справочниках. Некоторые значения $\Phi(t)$, часто используемые на практике, приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Значения интеграла вероятности и доверительной вероятности для нормального закона распределения

Доверительный интервал t_d в значениях σ	1,64	1,96	2,58	2,81	3,00	3,29
$\Phi(t_d)$	0,4495	0,4750	0,4951	0,4975	0,4987	0,4995
$P_d = 2\Phi(t_d)$	0,9	0,95	0,99	0,995	0,997	0,999

Из табл. 3.3 следует, что для доверительной вероятности $P_d = 0,95$, которая часто принимается в практике инженерных измерений, ширина доверительного интервала составляет $\Delta_d = t_d \sigma = 1,96\sigma$.

Для несимметричного доверительного интервала $t_{d2} \neq -t_{d1}$. Характерным для практики оценки свойств строительных материалов является случай, когда правая граница доверительного интервала отсутствует, то есть $t_{d2} = \infty$ (рис. 3.7, б). В этом случае доверительную вероятность можно представить в виде суммы двух составляющих, одна – доверительная вероятность для интервала x_d-0 , вторая – для интервала $0-\infty$:

$$P_d = P_{\left.0\right|_{x_d}} + P_{\left.\infty\right|_0} = P_{\left.0\right|_{x_d}} + 0,5. \quad (3.19)$$

Доверительная вероятность для интервала x_d-0 составляет $1/2$ доверительной вероятности P_d' для симметричного доверительного интервала $x_d-x_d^*$ (см. рис. 3.7, б).

Пример. Определить левую границу несимметричного доверительного интервала для доверительной вероятности $P_d = 0,95$. Из формулы (3.19) следует

$$P_{\left.0\right|_{x_d}} = P_d - 0,5 = 0,95 - 0,5 = 0,45. \quad (3.20)$$

Таким образом, левая граница доверительного интервала t_d будет совпадать с левой границей симметричного интервала для доверительной вероятности $P_d' = 2 \cdot 0,45 = 0,90$. С учетом данных табл. 3.3 и формулы (3.18) для абсолютных значений величины x получим

$$x_d = x_m - t_d \sigma. \quad (3.21)$$

Границы доверительных интервалов иногда называют квантильными оценками величины. *Квантиль* – значение, которое величина x не превышает с заданной вероятностью. Например, 2,5 %-й квантиль совпадает с левой границей, а 97,5 %-й квантиль – с правой границей симметричного доверительного интервала для $P_d = 0,95$. С левой границей несимметричного (одностороннего) интервала

с $P_d = 0,95$ совпадает 5 %-й квантиль. Математическое ожидание x_m совпадает с 50 %-м квантилем величины X .

Грубой погрешностью измерения (*промахом*) называют погрешность измерения, существенно превышающую ожидаемую при данных условиях. Они возникают, как правило, из-за ошибок или неправильных действий оператора (неверный отсчет, ошибка в записях или вычислениях, неправильное пользование СИ и др.). Возможной причиной промаха могут быть сбои в работе технических средств, а также кратковременные резкие изменения условий измерений. Естественно, что грубые погрешности должны быть обнаружены и исключены из ряда измерений.

Часто промахи сразу видны в ряду измерений, и, если возможно, эксперимент следует повторить. В противном случае наличие промаха необходимо доказать. Существует ряд критериев для вероятностной оценки промахов.

Для анализа наличия промаха часто используют критерий 3σ (три сигма). Если значение x_i превышает среднее значение результата измерения больше, чем на 3σ , то есть $|x_i - x_{cp}| > 3\sigma$, то такой результат относится к промахам и исключается из рассматриваемого ряда. Для нормального закона распределения вероятность появления такого результата (табл. 3.3) составляет $q = 1 - 0,997 = 0,003$. При обнаружении промаха значения x_{cp} и σ повторно вычисляют без учета x_i . Этот критерий надежен при большом числе измерений $n \geq 20-30$.

Метод 3σ универсален и может быть использован при любом законе распределения величины. Если закон распределения неизвестен, то метод 3σ формально применим, но при этом доверительная вероятность выявления промахов будет неизвестной.

Если число измерений невелико ($n \leq 20$), то рекомендуется использовать иные критерии: Романовского, Шовене. По критерию Шовене считают, что подозрительный результат x_i является промахом, если выполняется условие, приведенное ниже:

$$|x_i - x_{cp}| > \begin{cases} 1,6\sigma & \text{при } n = 3; \\ 1,7\sigma & \text{при } n = 6; \\ 1,9\sigma & \text{при } n = 8; \\ 2,0\sigma & \text{при } n = 10. \end{cases} \quad (3.22)$$

В ГОСТ Р 8.736–2011 [4] рекомендуется использовать критерий Граббса, который по методике применения аналогичен критерию Шовене. Статистический критерий Граббса используется для нормального распределения результатов наблюдений. Для наибольшего x_{\max} и наименьшего x_{\min} результатов измерений вычисляют критерии Граббса G_1 и G_2 , предполагая, что эти результаты вызваны грубыми погрешностями:

$$G_1 = \frac{|x_{\max} - x_{\text{ср}}|}{s_x}; \quad G_2 = \frac{|x_{\min} - x_{\text{ср}}|}{s_x}. \quad (3.23)$$

Далее сравнивают полученные значения G_1 и G_2 с теоретическим значением G_T при выбранном уровне значимости q . Если $G_1 > G_T$, то x_{\max} исключают как маловероятное значение. Если $G_2 > G_T$, то x_{\min} исключают как маловероятное значение. Далее вновь вычисляют среднее арифметическое и среднеквадратическое отклонения ряда результатов измерений и при необходимости повторяют процедуру проверки наличия грубых погрешностей²³.

3.4. Статистические характеристики выборки

Рассмотренные выше расчеты доверительных интервалов и вероятностей получены для идеализированной модели случайной погрешности, основанной на генеральной совокупности случайной величины. При использовании вариационного ряда конечного размера – *выборки* – следует ожидать снижения точности оценок статистических характеристик случайной величины. При этом оценка математического ожидания и оценка среднего квадратического отклонения, в свою очередь, приобретают вероятностный характер.

²³ Рассмотренные методики выявления промахов не следует рассматривать как некий универсальный способ устранения ошибок измерений. Если «подозрительных» результатов несколько и они появляются в процессе измерений регулярно, а по рассмотренным критериям они или подлежат исключению, или близки к предельным значениям, то это может свидетельствовать об их системном характере. Подозрение может вызывать не их «ошибочность», а то, что эти результаты являются проявлением неизвестных экспериментатору причин.

Основными статистическими характеристиками выборки являются:
– x_{cp} – среднее значение выборки случайной величины:

$$x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (3.24)$$

статистически среднее значение величины x_{cp} является наилучшей оценкой математического ожидания x_m ;

– $(x_i - x_{cp})$ – отклонение единичного i -го результата от среднего арифметического. Если в результаты измерений введены поправки, то отклонения от среднего арифметического значения можно рассматривать как случайные погрешности;

– s_x – выборочное среднее квадратическое отклонение единичных результатов в ряду измерений – оценка рассеяния единичных результатов измерений от их среднего арифметического значения; s_x рассчитывается по формуле

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}{n - 1}}. \quad (3.25)$$

Как следует из формулы (3.25), s_x имеет размерность самой величины X и является статистически наилучшим приближением величины σ (см. формулу (3.13)). Этот показатель иногда называют стандартным отклонением или стандартной погрешностью измерений.

– V_x – коэффициент вариации величины x :

$$V_x = s_x/x_{cp};$$

– $S_{x,cp}$ – среднее квадратическое отклонение среднего арифметического:

$$S_{x,cp} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}{n(n-1)}}. \quad (3.26)$$

Для генеральной совокупности математическое ожидание x_m является детерминированной величиной. Для выборки среднее арифметическое значение x_{cp} становится случайной величиной, разброс значений которой уменьшается по мере увеличения объема выборки n , это же касается и СКО (s_x) выборки, которое также приобретает некоторую вариацию. Если величина X подчиняется нормальному закону распределения плотности вероятности, то и ее среднее арифметическое значение подчиняется такому же закону, но с $n^{0.5}$ меньшим разбросом значений. Формула (3.26) указывает на возможность снижения случайной погрешности измерений путем накопления большего количества отсчетов значений измеряемой величины.

Оценкой рассеяния единичных результатов ряда измерений величины может также служить *размах результатов измерений* R_n . Размах определяют по формуле

$$R_n = x_{\max} - x_{\min}; \quad (3.27)$$

где x_{\max} , x_{\min} – наибольшее и наименьшее значения результатов серии измерений.

Стохастический характер параметров выборки дает основание предполагать увеличение коэффициента доверия t_d по мере уменьшения объема выборки. При этом следует различать доверительный интервал Δx_d для одиночных значений величины в выборке и доверительный интервал $\Delta x_{cp,d}$ для среднего арифметического значения этой величины. Доверительный интервал для одиночного значения величины x определяют по формуле

$$\Delta_d = t_{st} s_x, \quad (3.28)$$

где t_{st} – параметр распределения Стьюдента (коэффициент Стьюдента).

Значения коэффициента Стьюдента табулированы для определенных значений доверительной вероятности P_d и объема выборки n (степени свободы) и приводятся в справочниках (прил. А, табл. А1). По мере увеличения объема выборки, коэффициент Стьюдента приближается к коэффициенту доверия t_d , рассчитанному для нормального закона распределения; при $n > 15-20$ t_{st} принимается равным t_d . Доверительный интервал для среднего арифметического значения величины x определяют по аналогичной формуле:

$$\Delta_{d,cp} = t_{st} S_{x,cp}. \quad (3.29)$$

3.5. Математическая обработка результатов измерений

Под математической обработкой результатов измерений понимается обработка результатов многократных прямых или косвенных измерений одной и той же ФВ. Математическая обработка состоит из двух компонент: детерминированной обработки результатов измерений и их статистической обработки. Детерминированная обработка имеет место при получении результата косвенных измерений.

*Статистическая обработка результатов многократных прямых измерений*²⁴

Подготовка массива результатов измерений к статистической обработке заключается в их «исправлении» путем введения поправок. Напомним, что исключение систематических погрешностей не бывает абсолютным, в результатах могут оставаться невыявленные систематические составляющие, а также неисключенные остатки систематических погрешностей из-за погрешностей в их оценках.

Рассмотрим порядок статистической обработки исправленных результатов прямых измерений величины x .

1. Рассчитывается *точечная оценка* результата измерения $x_{\text{ср}}$:

$$x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.30)$$

2. Рассчитывается выборочное среднее квадратическое отклонение единичных результатов s_x по формуле (3.25).

3. Проверяется гипотеза о сходимости эмпирического и теоретического законов распределения по критериям согласия. При $n \geq 50$ для проверки принадлежности распределения к нормальному закону предпочтительно использование критерия Пирсона χ^2 . При $15 < n < 50$ для проверки принадлежности распределения к нормальному закону предпочтительным является составной критерий W . При $n \leq 15$ проверку принадлежности распределения к нормальному закону распределения не производят.

²⁴ Приведенная методика ориентирована на рекомендации ГОСТ Р 8.736–2011 [4].

4. Производится проверка на наличие промахов. При нормальном распределении погрешностей отбраковка производится по критерию 3σ либо (при $n \leq 20$) по критерию Шовене, Романовского или Граббса²⁵. Если отбракован хотя бы один результат, то вся процедура обработки повторяется с п. 1.

5. Рассчитывается оценка среднего квадратического отклонения среднего арифметического $S_{x,cp}$ по формуле (3.26).

6. Рассчитываются границы погрешности результата измерения Δ (границы доверительного интервала) по формуле (3.29). Обычно принимают $P_d = 0,95$; в особых случаях $P_d = 0,99$.

7. Результат записывается по форме

$$X = x_{cp} \pm \Delta. \quad (3.31)$$

Пример. Получить точечную оценку и доверительный интервал расстояния l между осями колонн каркаса здания по результатам пятикратных измерений расстояния (см. табл. 3.4). Систематическую погрешность считать устраненной, доверительную вероятность принять равной 0,95.

Таблица 3.4

Данные измерения расстояния между осями колонн

Результаты измерений l , м	$l_i - l_{cp}$, мм	$(l - l_{cp})^2$
8,155	-6	36
8,155	-6	36
8,16	-1	1
8,16	-1	1
8,175	14	196
$\sum l_i = 40,805$	$\sum (l_i - l_{cp}) = 0$	$\sum (l_i - l_{cp})^2 = 270$

²⁵ В некоторых практических задачах, например, при построении градуировочных зависимостей косвенных методов испытаний, отбраковка данных производится по иным критериям (см. тему 8).

Определяем среднее арифметическое значение результатов измерений

$$l_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i = \frac{40,805}{5} = 8,161 \text{ м.}$$

$$s_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - l_{\text{cp}})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{270}{4}} \approx 8,2 \text{ мм.}$$

Подозрительным на промах в табл. 3.4 является значение 8,175 м. Проверяем его отклонение от среднего по критерию Романовского. Для этого рассчитывается показатель

$$\beta = \left| \frac{x_i - x_{\text{cp}}}{s_x} \right|, \quad (3.32)$$

который сравнивают с табличным значением β_T , зависящем от числа измерений n и уровня значимости q (табл. 3.5). Если $\beta \geq \beta_T$, то результат x_i является промахом.

Таблица 3.5

Значения критерия Романовского β_T

q	Число измерений n											
	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
0,025	1,71	1,92	2,07	2,18	2,27	2,35	2,41	2,52	2,60	2,67	2,73	2,78
0,05	1,69	1,87	2,00	2,09	2,17	2,24	2,29	2,39	2,46	2,52	2,56	2,62
0,1	1,64	1,73	1,89	1,97	2,04	2,10	2,15	2,23	2,30	2,35	2,40	2,45

В нашем случае $\beta = \left| \frac{l_i - l_{\text{cp}}}{s_l} \right| = \frac{14}{8,2} \approx 1,71$.

Для $n = 5$ и $q = 1 - 0,95 = 0,05$ табличное значение $\beta_T = 1,87$, что больше рассчитанного значения β . Таким образом, подозрительный результат не является промахом и остается в ряду значений.

Определяем среднее квадратическое отклонение среднего арифметического $S_{l, \text{cp}}$:

$$S_{l, \text{cp}} = \frac{s_l}{\sqrt{n}} = \frac{8,2}{\sqrt{5}} \approx 3,67 \text{ мм.}$$

Находим границы доверительного интервала $\Delta_{\text{д.ср}}$:

$$\Delta_{\text{д.ср}} = t_{\text{ст}} S_{l, \text{cp}} = 2,77 \cdot 3,67 \approx 10,2 \text{ мм.}$$

Таким образом, окончательный результат можем записать в виде

$$L = 8,161 \pm 0,010 \text{ м.}$$

Статистическая обработка результатов многократных косвенных измерений

Рассмотрим зависимость $y = F(x)$, где y – результат косвенного измерения; x – аргумент (результат прямого измерения). Последовательность оценки погрешности косвенных измерений для одного аргумента следующая.

1. Рассчитывается значение искомой ФВ – точечной оценки результата косвенных измерений y – на основании известной функциональной зависимости этой величиной от величин, подвергаемых прямым измерениям и точечной оценки результата измерения аргумента $x_{\text{ср}}$:

$$y = F(x_{\text{ср}}). \quad (3.33)$$

2. Предполагается, что абсолютная погрешность измерения аргумента x известна и составляет Δ_x . В этом случае можем записать

$$y \pm \Delta_y = F(x_{\text{ср}} \pm \Delta_x), \quad (3.34)$$

где Δ_y – абсолютная погрешность измерения величины y .

В первом приближении, разложив правую часть уравнения (3.34) в ряд Тейлора и пренебрегая членами ряда, содержащими Δ_x в степени выше первой, получим

$$y \pm \Delta_y = F(x_{\text{ср}}) \pm \Delta_x \left. \frac{dF(x)}{dx} \right|_{x=x_{\text{ср}}}, \quad (3.35)$$

откуда следует

$$\Delta_y = \Delta_x \left. \frac{dF(x)}{dx} \right|_{x=x_{cp}}. \quad (3.36)$$

3. Результат записывается по форме

$$y = F(x_{cp}) \pm \Delta_y. \quad (3.37)$$

Для относительной погрешности измерений величины y можем записать:

$$\delta_y = \frac{\Delta_x}{y} \left. \frac{dF(x)}{dx} \right|_{x=x_{cp}}. \quad (3.38)$$

Если выражение для $F(x)$ представляет собой степенной одночлен вида Ax^B , то с учетом (3.38) можем записать

$$\delta_y = \frac{\Delta_x ABx^{B-1}}{Ax^B} = \frac{\Delta_x}{x} B = B\delta_x, \quad (3.39)$$

то есть относительная погрешность косвенного измерения будет равна относительной погрешности измерения аргумента, увеличенной в B раз.

Пример. Чему будет равна погрешность определения площади круга S , если относительная погрешность измерения его радиуса R составляет 2 %?

Решение. Выражение для площади круга представляет собой одночлен второй степени $S = \pi R^2$. $B = 2$, $\delta_R = 2\%$, следовательно, относительная погрешность δ_S оценки площади круга составит $\delta_S = B\delta_R = 2 \cdot 2\% = 4\%$.

Выражение (3.36) для оценки погрешности удобно, если функция $F(x)$ задана в аналитической форме. На практике функцию $F(x)$ часто получают экспериментально в табличном или графическом виде. Кроме того, как уже отмечалось выше, формула (3.36) дает приблизительную оценку погрешности. Для практики измерений более удобной может оказаться методика, основанная на более простых соотношениях. Из выражения (3.34) следует

$$\pm\Delta_y = F(x_{cp} \pm \Delta_x) - y = F(x_{cp} \pm \Delta_x) - F(x_{cp}), \quad (3.40)$$

соответственно, для относительной погрешности измерений δ_y можем записать

$$\delta_y = \frac{F(x_{cp} \pm \Delta_x) - F(x_{cp})}{F(x_{cp})} = \frac{F(x_{cp} \pm \Delta_x)}{F(x_{cp})} - 1. \quad (3.41)$$

Рассмотрим более сложный случай, когда результат косвенного измерения y является функцией нескольких аргументов, то есть $y = F(x, h, \dots, w)$, где x, h, \dots, w – результаты прямых измерений (аргументы). Последовательность обработки результатов измерений следующая.

1. Рассчитываются значения искомой ФВ – точечной оценки результата косвенных измерений y_{cp} – на основании известной функциональной зависимости этой величины от величин, подвергаемых прямым измерениям, и точечных оценок результатов измерений аргументов $x_{cp}, h_{cp}, \dots, w_{cp}$:

$$y_{cp} = F(x_{cp}, h_{cp}, \dots, w_{cp}). \quad (3.42)$$

2. Зная погрешности прямых измерений каждого аргумента, можно рассчитать составляющие погрешности искомой величины через частные производные функции $F(x, h, \dots, w)$ по соответствующему аргументу:

$$\Delta_{y(x)} = \Delta_x \left. \frac{\delta F}{\delta x} \right|_{x=x_{cp}, h=h_{cp}, w=w_{cp}} ; \quad (3.43)$$

$$\Delta_{y(h)} = \Delta_h \left. \frac{\delta F}{\delta h} \right|_{x=x_{cp}, h=h_{cp}, w=w_{cp}} ; \quad (3.44)$$

...

$$\Delta_{y(w)} = \Delta_w \left. \frac{\delta F}{\delta w} \right|_{x=x_{cp}, h=h_{cp}, w=w_{cp}} , \quad (3.45)$$

где $\Delta_x, \Delta_h, \dots, \Delta_w$ – погрешности прямых измерений аргументов.

На практике определение составляющих погрешности искомой величины удобнее производить, пользуясь следующими формулами:

$$\pm\Delta_{y(x)} = F[(x_{\text{cp}} \pm \Delta_x), h_{\text{cp}}, \dots, w_{\text{cp}}] - y_{\text{cp}}; \quad (3.46)$$

$$\pm\Delta_{y(h)} = F[(x_{\text{cp}}, (h_{\text{cp}} \pm \Delta_h), \dots, w_{\text{cp}}] - y_{\text{cp}}; \quad (3.47)$$

...

$$\pm\Delta_{y(w)} = F[(x_{\text{cp}}, h_{\text{cp}}, \dots, w_{\text{cp}} \pm \Delta_w)] - y_{\text{cp}}. \quad (3.48)$$

3. Объединение (суммирование) составляющих погрешности по формуле

$$\Delta_y = \sqrt{\Delta_{y(x)}^2 + \Delta_{y(h)}^2 + \dots + \Delta_{y(w)}^2}. \quad (3.49)$$

С учетом (3.43)–(3.45) можно записать

$$\Delta_y = \sqrt{\left(\frac{\delta F}{\delta x}\right)^2 \Delta_x^2 + \left(\frac{\delta F}{\delta h}\right)^2 \Delta_h^2 + \dots + \left(\frac{\delta F}{\delta w}\right)^2 \Delta_w^2}. \quad (3.50)$$

Величины $\frac{\delta F}{\delta x}$, $\frac{\delta F}{\delta h}$, ..., $\frac{\delta F}{\delta w}$ можно рассматривать как весовые коэффициенты для каждой из погрешностей измерений аргументов или как коэффициенты влияния аргументов на результат y . Значение суммарной относительной погрешности δ_y косвенного измерения выражается зависимостью

$$\delta_y = \sqrt{\left(\frac{\delta F}{\delta x}\right)^2 \left(\frac{\Delta_x}{y}\right)^2 + \left(\frac{\delta F}{\delta h}\right)^2 \left(\frac{\Delta_h}{y}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta F}{\delta w}\right)^2 \left(\frac{\Delta_w}{y}\right)^2}. \quad (3.51)$$

Следует иметь в виду, что составляющие погрешности объединяются геометрическим суммированием (формула (3.49)) только в том случае, если аргументы x , h , ..., w не коррелированы, то есть являются статистически независимыми.

Корреляция и регрессия (см. тему 8). В отличие от функциональной зависимости двух величин X и Y , когда каждому значению x однозначно соответствует определенное значение y , при их статисти-

ческой (вероятностной) зависимости, каждой паре значений x_i и y_i соответствует определенная вероятность. Степень зависимости таких величин называют корреляцией. Форму корреляционной связи часто описывают функцией (или кривой) регрессии, которая в аналитическом представлении может быть линейной, квадратичной, экспоненциальной и т. д. Линейную регрессионную зависимость записывают в виде

$$y(x) = a_0 + a_1x, \quad (3.52)$$

где a_0 и a_1 – коэффициенты.

Кривую, а в рассмотренном примере прямую, регрессии строят таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений значений y_i от $y(x_i)$ была бы минимальной, – так называемый метод наименьших квадратов (МНК).

На рис. 3.8 в качестве примера приведены данные долговременных наблюдений угла наклона монолитной колонны несущего каркаса высотного здания и окружающей температуры.

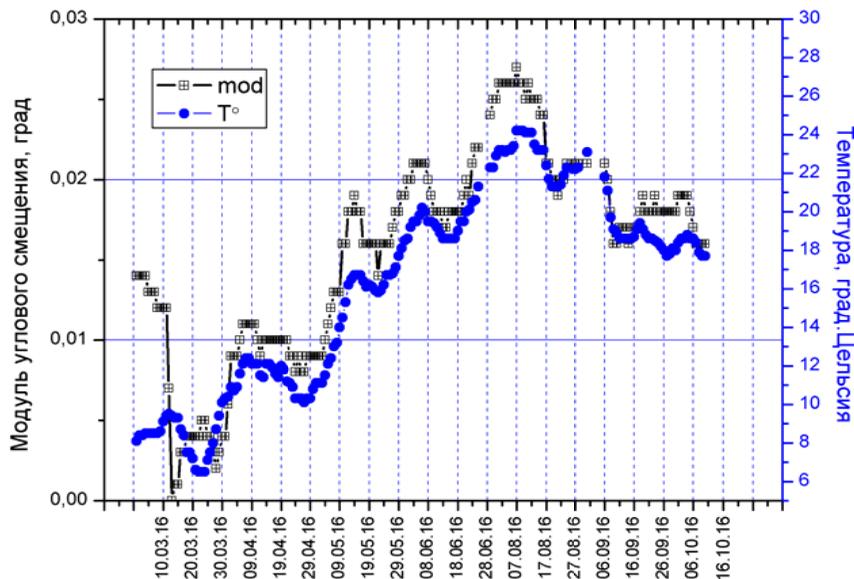


Рис. 3.8. Совместные временные диаграммы угловых смещений монолитной колонны высотного здания и температуры

Отчетливо видно, что положение на оси времени локальных максимумов и минимумов для пар отсчетов приблизительно совпадает, то есть в поведении рассматриваемых параметров присутствует заметный синхронизм. Эти признаки указывают на коррелированность результатов измерений углов наклона колонн и температуры. Если каждую пару коррелированных величин отобразить графически в координатах рассматриваемых величин, то все точки данных будут группироваться вокруг некоторой прямой – линии регрессии (рис. 3.9).

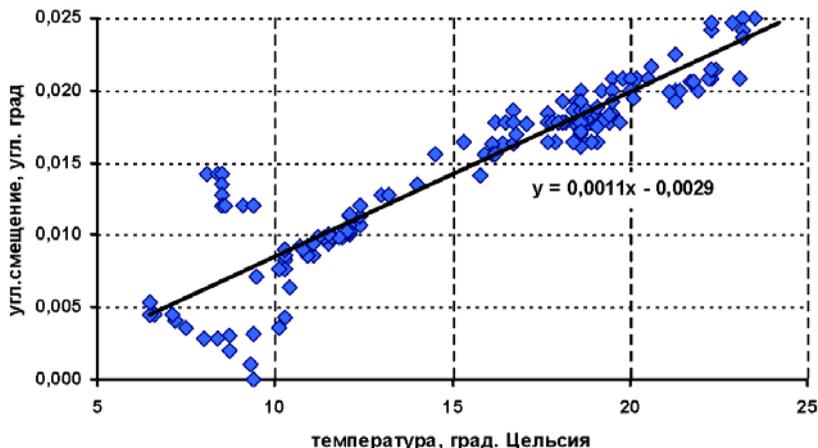


Рис. 3.9. Диаграмма рассеяния и регрессионная зависимость угла наклона колонны от температуры (коэффициент корреляции угла и температуры $r = 0,93$)

Степень «жесткости» корреляционной связи двух величин оценивают корреляционным отношением. Частным случаем корреляционного отношения, когда связь между случайными величинами линейна, является коэффициент корреляции r пар величин. В общем случае для величин q и z коэффициент корреляции $r(q, z)$ рассчитывается для согласованных пар результатов (q_i, z_i) по формуле

$$r(q, z) = \frac{\sum_{i=1}^n (q_i - q_{\text{cp}})(z_i - z_{\text{cp}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - q_{\text{cp}})^2 \sum_{i=1}^n (z_i - z_{\text{cp}})^2}}, \quad (3.53)$$

где n – количество согласованных пар результатов измерений.

Коэффициент корреляции может принимать значения от -1 до $+1$. При «жесткой» функциональной связи величин коэффициент корреляции равен единице (минус единице), при отсутствии статистической зависимости величин коэффициент равен нулю²⁶.

В зависимости от значения коэффициента корреляции выделяют сильнокоррелированные величины, к ним практически следует отнести те, для которых модуль коэффициента корреляции $|r(q, z)| > 0,6-0,7$, и слабокоррелированные – при $|r(q, z)| < 0,6-0,7$.

При обработке данных косвенных измерений процедуру учета корреляции аргументов часто упрощают, выделяя группу слабокоррелированных и группу сильнокоррелированных погрешностей. Для группы слабокоррелированных погрешностей (условно принимая $r(q, z) = 0$) составляющие погрешности суммируют по правилу геометрического сложения, используя формулу (3.49). Для сильнокоррелированных погрешностей, считая $|r(q, z)| = 1$, производят алгебраическое суммирование составляющих погрешностей. Окончательное значение результирующей погрешности вычисляют как геометрическую сумму сильно- и слабокоррелированных составляющих погрешности.

²⁶ При расчете погрешностей взаимная корреляция величин учитывается введением дополнительных слагаемых в формулы (3.49) и (3.51). Рассмотрим формулу (2.12). Очевидно, что вариация длины арматурного образца будет приводить и к соответствующей вариации его массы. Если это не учитывать, то расчет погрешности определения диаметра будет давать завышенные значения. Для двух параметров – массы m и длины l – формула расчета погрешности диаметра стержня будет иметь вид

$$\delta d = \sqrt{\delta d_m^2 + \delta d_l^2 + 2r_{m,l}\delta d_m\delta d_l},$$

где δd_m и δd_l – составляющие относительной погрешности диаметра, обусловленные погрешностями определения массы и длины;

$r_{m,l}$ – коэффициент корреляции массы и длины испытательных образцов.

Например, если составляющие относительной погрешности диаметра будут равны 1 %, а коэффициент их корреляции будет близок к единице, то относительная погрешность определения диаметра с учетом корреляции массы и длины будет близка к 0 %:

$$\delta d = \sqrt{(0,5 \cdot 0,01)^2 + (-0,5 \cdot 0,01)^2 + 2 \cdot 1 \cdot (0,5 \cdot 0,01)(-0,5 \cdot 0,01)} \approx 0 \text{ \%}.$$

4. Результат записывается по форме

$$y = F(x_{\text{ср}}, h_{\text{ср}}, \dots, w_{\text{ср}}) \pm \Delta_y. \quad (3.54)$$

3.6. Правила округления результата измерения

1. Округление производится только один раз при получении окончательного результата²⁷.

2. Округление начинают с округления погрешности результата измерения.

3. Погрешность результата измерения округляют до двух значащих цифр²⁸, если первая значащая цифра округляемой погрешности не более трех.

Погрешность результата измерения округляют до одной значащей цифры, если первая значащая цифра округляемой погрешности больше трех²⁹; при этом иногда оставляют второй цифрой 0 или 5.

²⁷ Универсального правила округления промежуточных результатов вычислений не существует. Точнее, на основе подробного анализа расчетной формулы и величин аргументов можно определить допустимую степень округления промежуточных результатов, но этот анализ может оказаться значительно более затратным, чем расчет с максимально возможной точностью представления промежуточных результатов. Особенно «опасны» формулы, в которых присутствуют операции вычитания близких по значению величин. Например, $X = (A + B)/(A - B)$, где A и B – промежуточные результаты вычислений: $A = 10,383$; $B = 10,347$.

Для «точных» значений A и B $X = 20,730/0,036 = 575,8$. Если A и B округлить до трех значащих цифр, то получим $A = 10,4$; $B = 10,3$, $X = 20,7/0,1 = 207$. Второй результат получился в 2,78 раза меньше, чем первый, то есть погрешность составила почти 180%! Промежуточные результаты вычислений всегда желательно сохранять с максимально возможной точностью, что при использовании компьютера в инженерных расчетах не представляется обременительным.

²⁸ Все цифры десятичной записи числа, начиная с первой ненулевой слева, называются значащими цифрами этого числа. Нули в конце числа всегда считаются значащими, в противном случае их не пишут. Так, число 0,080530 содержит пять значащих цифр: 8, 0, 5, 3, 0.

²⁹ Указанный уровень округления связан в значительной степени с тем, что полученное при измерениях значение погрешности само имеет погрешность. В основе расчетного значения случайной составляющей погрешности

4. Оценка результата измерения округляется так, чтобы она заканчивалась цифрой того же разряда, что и значение погрешности. Если оценка результата заканчивается нулями, то нули отбрасываются только до того разряда, который соответствует младшему разряду в значении погрешности.

5. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов меньше пяти, то остающиеся цифры не меняются. Если эта цифра равна или больше пяти, то последнюю оставляемую цифру увеличивают на единицу.

Например, результат определения высоты здания с помощью теодолита $H = 35,2576$ м при погрешности $\Delta H = 0,0232$ м. После округления $\Delta H = 0,023$ м, $H = 35,258$ м; результат измерения можно записать в виде $H = (35,258 \pm 0,023)$ м. В случае если погрешность $\Delta H = 0,461$ м, то после округления результат измерений следовало бы записать в виде $H = (35,3 \pm 0,5)$ м.

6. Если при округлении младшая из остающихся цифр равна нулю, то этот ноль является значащей цифрой и в записи результата должен оставаться. Например, $X = 7,9644$, $\Delta X = 0,4733$. после округления результат можем записать в виде $X = 8,0 \pm 0,5$. Запись в виде $X = 8 \pm 0,5$ будет неправильной.

7. Если результат записывается в экспоненциальной форме, то множитель порядка должен быть одинаковым для точечной оценки и для погрешности и выноситься за скобки. Например, запись $X = 27190334 \pm 5,1214 \cdot 10^3$ в исправленном виде будет выглядеть следующим образом: $X = (27190 \pm 5) \cdot 10^3$.

8. Цифра старшего разряда оценки результата измерения должна отличаться от нуля, если она не единственная.

определения величины X используется среднее квадратическое отклонение s_x , среднее квадратическое отклонение которого σ_s при n единичных отсчетах величины x может быть найдено по формуле

$$\sigma_s \approx \frac{s_x}{\sqrt{2(n-1)}}. \quad (3.55)$$

При $n = 25$ величина σ_s составит $1/7$ от s_x , при $n = 50$ величина σ_s составит $1/10$ от s_x . Поэтому уже вторая значащая цифра в десятичном представлении погрешности является сомнительной.

В табл. 3.6 приведены примеры исправления записей результатов измерений.

Таблица 3.6

Примеры округления результатов измерений

Запись до округления	Запись после округления
$322\ 375 \pm 876$	$322\ 700 \pm 800$ или $(3227 \pm 8) \cdot 10^2$
$327,466 \pm 0,144$	$327,47 \pm 0,14$
$2,046 \pm 0,000442$	$2,0460 \pm 0,0004$ или $2,04600 \pm 0,00045$
$237\ 681 \pm 405$	$(2377 \pm 4) \cdot 10^2$
$64,857 \cdot 10^{-2} \pm 58,5 \cdot 10^{-4}$	$(649 \pm 6) \cdot 10^{-3}$
$0,0000003731 \pm 0,000722$	$(0 \pm 7) \cdot 10^{-4}$
$(0,0000002235 \pm 0,00000831)$ м	(2 ± 8) мкм или $(2 \pm 8) \cdot 10^{-6}$ м

Приведенные правила округления ориентированы на рекомендации ГОСТ Р 8.736–2011 [4]. В литературе можно встретить несколько отличающиеся правила округления погрешностей, в частности, иногда рекомендуется округлять их всегда в большую сторону, ограничиваясь при этом двумя значащими цифрами.

4. КОНЦЕПЦИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Важной составляющей процесса экономической и научной интеграции международного сообщества является гармонизация стандартов и других нормативных документов, в том числе в области метрологии, с целью устранения барьеров в торговом, промышленном, научном и культурном сотрудничестве.

В 1993 году по инициативе семи международных организаций:

- Международного бюро мер и весов (*BIPM*);
- Международной электрической комиссии (*IEC*);
- Международной организации по стандартизации (*ISO*);
- Международной организации законодательной метрологии (*OIML*);
- Международного союза по чистой и прикладной химии (*IUPAC*);
- Международного союза по чистой и прикладной физике (*IUPAP*);
- Международной федерации клинической химии (*IFCC*)

была предложена новая концепция для показателя точности результатов измерений, которую положили в основу разработанного документа «Руководство по выражению неопределенности измерения [3, 28, 43]; в дальнейшем указанный документ будем обозначать как *Руководство*.

Главной целью документа являлось предоставление универсального метода для выражения и оценивания неопределенности результата измерения, применимого ко всем видам измерений и всем типам данных, используемых при измерениях.

После издания в 1993 г. Руководство постепенно приобрело статус международного регламента выражения качества измерений, который привнес согласованность в научные и технологические измерения и всемирное единство в оценке и выражении неопределенности в измерениях. В настоящее время происходит внедрение положений Руководства в отечественные нормативные документы³⁰.

Одной из причин, стимулировавших развитие нового подхода, вероятно можно рассматривать существующее несоответствие принятого понятия погрешности и установившегося порядка ее оценки для результатов измерений. Напомним, погрешность измерений – это разница между результатом измерения и истинным (действительным) значением величины. Заметим, что при измерениях действительное значение величины не известно³¹. А если бы было известно, то зачем производить измерения, если мы уже имеем «идеальный» результат? Кроме того, результат измерений может оказаться (случайно) очень близким к действительному значению измеряемой

³⁰ В Республике Беларусь концепция «неопределенности» измерений входит в практику строительной сферы, главным образом, через внедрение стандартов Евросоюза.

³¹ Термины «истинное (действительное) значение» и «погрешность» в классическом понимании более уместны для процедуры поверки средств измерений. В этом случае имеет место сопоставление «действительного» значения величины эталонного образца с результатами измерений этой величины поверяемым средством измерений. Поэтому заменять понятие «погрешность средства измерения» на «неопределенность средства измерения», по-видимому, не следует. В практической работе целесообразно использовать два показателя точности: неопределенность результатов измерений и погрешность средств измерений.

величины, то есть иметь фактически очень малую погрешность. И, в то же время, доверия этот результат может не вызывать.

Получается, что практически оценить погрешность измерений в соответствии с приведенным выше определением невозможно: определение погрешности существует само по себе, а найденные погрешности – сами по себе. Возникла необходимость устранения этого противоречия – либо изменить определение погрешности, либо поменять порядок ее расчета.

Руководством введено в обращение понятие «неопределенности» как характеристики качества измерений. Концепция неопределенности заключается в следующем. Базовые понятия классической теории точности – истинное значение, действительное значение и погрешность измерения – не вводятся (при этом подразумевается, что истинное (действительное) значение величины существует, поскольку признается, что целью измерения является нахождение этого значения). Неопределенность измерения понимается как сомнение, неполное знание значения измеряемой величины после проведения измерений. Этот же термин относится и к количественным характеристикам этого неполного знания. Формальное определение термина и понятия «неопределенность измерения», разработанное для использования в Руководстве, следующее: неопределенность (измерения) есть параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует дисперсию значений, которые могли быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

Примечание. Параметром может быть, например, стандартное отклонение (или данное кратное ему) или полуширина интервала, имеющего установленный уровень доверия.

Далее это понятие уточняется: неопределенность – параметр, связанный с результатом измерения и характеризующий рассеяние значений, которые могли бы быть приписаны измеряемой величине. В математической статистике известны два вида параметров, характеризующих рассеяние некоррелированных случайных величин: СКО и доверительный интервал. Они и принимаются в качестве характеристик неопределенности с наименованиями «стандартная неопределенность» и «расширенная неопределенность». При этом, как и следовало ожидать, оказалось, что стандартная неопределенность является полным аналогом СКО погрешности измерений, а расширенная неопределенность – полным аналогом доверительных

границ погрешности измерений. И в этом указанная концепция сокинулась с традиционной постановкой задачи оценивания точности измерений³².

Неопределенность измерения может быть следствием двух причин:

1) рассеяния результата измерения при многократном повторении измерительной процедуры, что является объективным законом природы;

2) отсутствия необходимой информации, то есть недостаточности каких-то сведений, знаний, что характерно не только для измерений.

Аналогично погрешностям, неопределенности измерений могут быть классифицированы по различным признакам.

1. По способу выражения их подразделяют на абсолютные и относительные. Абсолютная неопределенность измерения – неопределенность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины. Относительная неопределенность результата измерений – отношение абсолютной неопределенности к результату измерений.

2. По источнику возникновения неопределенности измерений, подобно погрешностям, можно разделять на инструментальные, методические и субъективные.

3. По характеру проявления погрешности разделяют на систематические, случайные и грубые. В Руководстве отсутствует классификация неопределенностей по этому признаку. В самом начале документа указано, что перед статистической обработкой рядов измерений все известные систематические погрешности должны быть из них исключены. Поэтому деление неопределенностей на систематические и случайные не вводилось³³.

³² Концепцию «неопределенности» не следует противопоставлять концепции «классической теории погрешностей» уже хотя бы потому, что в обеих используется один и тот же математический аппарат и конечный результат – «оценки качества измерений» – может быть представлен в одной и той же форме. Сегодня во многих странах в качестве характеристики качества результата измерений используется только понятие «неопределенность». В Республике Беларусь, России и ряде других стран СНГ представление результата пока возможно как в терминах «погрешность», так и в терминах «неопределенность».

³³ В некотором строгом смысле, систематическую погрешность вообще нельзя считать погрешностью, поскольку она известна (или может быть определена), а значит может быть устранена поправкой. Невыявленная

4. По способу оценивания неопределенности в Руководстве делится на два типа:

1) неопределенность, оцениваемая по типу *A* (неопределенность типа *A*), – неопределенность, которую оценивают статистическими методами на основе результатов ряда измерений;

2) неопределенность, оцениваемая по типу *B* (неопределенность типа *B*), – неопределенность, которую оценивают нестатистическими методами на основе априорной нестатистической информации.

На первый взгляд может показаться, что это нововведение п. 4 заключается лишь в замене существующих терминов известных понятий другими. Действительно, статистическими методами можно оценить только случайную погрешность, и поэтому неопределенность типа *A* – это то, что ранее называлось случайной погрешностью. Аналогично НСП можно оценить только на основе априорной информации, и поэтому между неопределенностью по типу *B* и НСП также имеется взаимное соответствие. При этом заметим, что оба метода основаны на вероятностном оценивании распределения случайных величин.

Термины «неопределенность типа *A*» или «неопределенность типа *B*» нельзя признать удачными, поскольку неопределенность всегда одна. Под этими терминами следует понимать лишь два разных метода оценивания неопределенности. Поэтому корректными будут наименования: неопределенность, оцениваемая по типу *A*, и неопределенность, оцениваемая по типу *B*.

Несмотря на введение новых понятий и терминов, традиционное разделение погрешностей на систематические, НСП и случайные также не теряет своего значения, поскольку оно точнее отражает другие признаки: характер проявления в результате измерения и причинную связь с эффектами, являющимися источниками погрешностей. Таким образом, классификации неопределенностей и погрешностей измерений не являются альтернативными и взаимно дополняют друг друга.

систематическая погрешность по своей физической сущности (причине возникновения) является систематической погрешностью и потенциально может быть выявлена, но по характеру проявления (пока она не выявлена) она выглядит случайной величиной и оценивается с использованием методов статистики. Именно здесь стирается граница между случайными и систематическими погрешностями. Поэтому отсутствие в Руководстве разделения неопределенностей на систематические и случайные выглядит правомерным.

В Руководстве имеются и некоторые другие терминологические нововведения. Ниже приведена сводная таблица терминологических отличий концепции неопределенности от классической теории точности [29] (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Термины – примерные аналоги концепции неопределенности и классической теории погрешностей

Теория погрешностей	Концепция неопределенности
Погрешность результата измерения	Неопределенность результата измерения
Случайная погрешность	Неопределенность, оцениваемая по по типу <i>A</i>
Неисключенная систематическая погрешность (НСП)	Неопределенность, оцениваемая по по типу <i>B</i>
Среднее квадратическое отклонение (стандартное отклонение) результата измерения	Стандартная неопределенность результата измерения
Доверительные границы результата измерения	Расширенная неопределенность результата измерения
Доверительная вероятность	Вероятность охвата (покрытия)
Квантиль (коэффициент) распределения погрешности	Коэффициент охвата (покрытия)

Новые термины, указанные в этой таблице, имеют следующие определения:

1. *Стандартная неопределенность* – неопределенность результата измерения, выраженная в виде стандартного отклонения.

2. *Расширенная неопределенность* – величина, задающая интервал вокруг результата измерения, в пределах которого можно ожидать нахождения большей части распределения значений, которые с достаточным основанием могут быть приписаны измеряемой величине.

3. *Вероятность охвата* – вероятность, которой, по мнению экспериментатора, соответствует расширенная неопределенность результата измерений.

4. *Коэффициент охвата* – коэффициент, зависящий от вида распределения неопределенности результата измерений и вероятности охвата и численно равный отношению расширенной неопределен-

ности, соответствующей заданной вероятности охвата, к стандартной неопределенности.

4.1. Определение стандартной неопределенности по типу A

Рассмотрим порядок определения стандартной неопределенности³⁴ u_A по типу A при проведении прямых многократных измерений. Предполагаем, что для величины Q получено n независимых наблюдений в одинаковых условиях измерений x_1, x_2, \dots, x_n .

1. *Оценкой* величины Q будет среднее арифметическое значение q_{cp} из n наблюдений q_i ($k = 1, 2, \dots, n$)

$$q_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i. \quad (4.1)$$

2. Рассчитываем *стандартную неопределенность* $u_A(q)$ единичного измерения

$$u_A(q) = s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_i - q_{\text{cp}})^2}. \quad (4.2)$$

3. Рассчитываем *стандартную неопределенность* $u_A(q_{\text{cp}})$ измерений, являющуюся экспериментальным стандартным отклонением среднего значения

$$u_A(q_{\text{cp}}) = s(q_{\text{cp}}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (q_i - q_{\text{cp}})^2}. \quad (4.3)$$

4.2. Определение стандартной неопределенности по типу B

Исходными данными для расчетов может служить вся доступная информация об изменчивости Q . Это может быть следующая информация:

³⁴ Обозначения для выражения неопределенностей – u , u_A , u_B , u_c , U – происходят от слова *uncertainty* (англ.) – неопределенность.

- данные предшествовавших измерений величин, входящих в уравнение измерения;
- данные, основанные на опыте исследований и сведениях о поведении и свойствах использованных материалов и приборов;
- данные, приводимые в свидетельствах о калибровке и поверке средств измерений;
- неопределенности констант, указываемые в справочных данных.

Имеющуюся информацию о величинах изменчивости Q необходимо описать с использованием функций распределения вероятностей, для того чтобы определить их оценки и стандартные отклонения. Обычно неопределенность этих данных представлена в виде предельных границ отклонений величин. При этом часто используются следующие основные распределения (рис. 4.1): равномерное (прямоугольное), треугольное и нормальное.

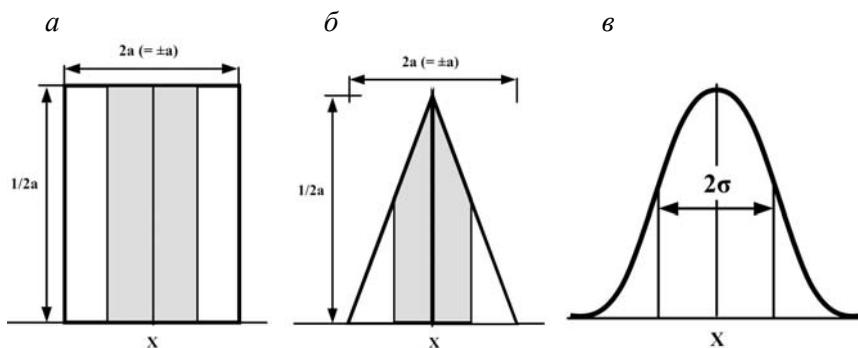


Рис.4.1. Характерные законы распределения:
 а – равномерное (прямоугольное); б – треугольное; в – нормальное

Равномерное распределение принимается в случаях, когда можно определить только границы интервала a_- и a_+ для Q , а вероятность того, что значение величины Q находится в этом интервале, практически равна единице, а за его пределами – нулю, и нет другой информации о распределении вероятности для Q внутри интервала. В этом случае математическое ожидание величины Q является средней точкой интервала a_- – a_+ , а составляющая стандартной неопределенности $u_B(q_i)$ определяется по формуле

$$u_B(q_i) = \frac{(a_+ - a_-)}{2\sqrt{3}} = \frac{a}{\sqrt{3}}. \quad (4.4)$$

Если, кроме известных границ интервала a_- и a_+ , известно, что значения рассматриваемой величины более вероятны у центра интервала, чем у его границ, то лучшим вариантом будет использование треугольного распределения. Для этого случая математическое ожидание величины Q является средней точкой интервала a_-a_+ , а составляющую стандартной неопределенности $u_B(q_i)$ определяют по формуле

$$u_B(q_i) = \frac{a}{\sqrt{6}}. \quad (4.5)$$

Если можно предполагать нормальный закон распределения, а вероятность «попадания» величины Q в интервал от a_- до a_+ составляет примерно $2/3$, то составляющая стандартной неопределенности будет равна $u_B(q_i) = (a_+ - a_-)/2 = \sigma$, то есть половине доверительного интервала для доверительной вероятности $P_d \approx 0,68$.

Заметим, что оценка неопределенности по типу B может быть не менее надежной, как и оценка по типу A , особенно в случаях, когда оценивание по типу A основывается на выборке небольшого объема.

4.3. Определение суммарной стандартной неопределенности

Суммарная стандартная неопределенность (ССН) – стандартная неопределенность результата измерения, когда результат получают из значений ряда других величин. ССН равна квадратному корню суммы членов, каждый из которых является дисперсией или ковариацией других величин, взятых с соответствующими весами. По существу, речь идет о суммировании случайных величин. Если $Y = F(X_1, X_2, \dots, X_m)$, то для некоррелированных величин X_1, X_2, \dots, X_m суммарная неопределенность измерения величины $u_c(y)$ определяется по формуле

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{df}{dx_i} u^2(x_i) \right), \quad (4.6)$$

где $u(x_i)$ – стандартная неопределенность величины X_i (рассчитанная по типу A или типу B).

В случае коррелированных результатов измерений величин X_1, X_2, \dots, X_m суммарная стандартная неопределенность вычисляется с учетом коэффициентов корреляции по формуле

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{df}{dx_i} u^2(x_i) \right) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \left(\frac{df}{dx_i} \frac{df}{dx_j} r(x_i, x_j) u^2(x_i) u^2(x_j) \right),$$

где $r(x_i, x_j)$ – коэффициент корреляции пар величин X_i и X_j .

Стандартная неопределенность каждой из величин X_1, X_2, \dots, X_m может рассматриваться в общем виде как геометрическая сумма составляющих неопределенности, рассчитанных по типу A и B .

$$u(x_i) = \sqrt{u_A^2(x_i) + u_B^2(x_i)}. \quad (4.7)$$

Коэффициенты чувствительности df/dx_i , кроме аналитического метода расчета путем дифференцирования функции F , могут определяться экспериментально, регистрируя приращения Y , вызванные изменением величины X_i , поддерживая при этом остальные входные величины неизменными.

4.4. Определение расширенной неопределенности

Часто возникает необходимость знать меру неопределенности, выраженную в виде интервала значений результатов измерения, в пределах которого можно ожидать распределения большей части значений, которые можно с достаточным основанием приписать измеряемой величине. Такая дополнительная мера неопределенности получила название *расширенной неопределенности* и обозначается символом U . Расширенную неопределенность U получают умножением суммарной стандартной неопределенности $u_c(y)$ на *коэффициент охвата* k

$$U = k u_c(y). \quad (4.8)$$

Разумеется, умножение $u_c(y)$ на какую-то постоянную величину не дает никакой новой информации, а просто представляет ранее имевшуюся информацию в новом виде.

В случаях, когда измеряемой величине может быть приписано нормальное распределение вероятностей, для расчета расширенной неопределенности $U_p = k_p u_c(y)$, обеспечивающей *уровень доверия* p , для k_p можно использовать значения из табл. 4.2.

Таблица 4.2

Значения коэффициента охвата

Уровень доверия p , %	Коэффициент охвата k_p
68,27	1
90	1,64
95	1,96
99	2,58

Когда распределение вероятностей результата измерения описывается распределением Стьюдента (t – распределением), коэффициент охвата k_p выбирают в соответствии с формулой

$$k_p = t_p(v_{eff}), \quad (4.9)$$

где $t_p(v_{eff})$ – квантиль распределения Стьюдента с эффективным числом степеней свободы v_{eff} и доверительной вероятностью (уровнем доверия) p .

Число степеней свободы v_{eff} определяют по формуле Велча-Саттерсвейта:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{v_i}}, \quad (4.10)$$

где $u_i(y)$ – вклады в стандартную неопределенность $u_c(y)$ при определении оценки i -й входной величины;

v_i – степени свободы вклада неопределенности $u_i(y)$ – $v_i = n_i - 1$ – для вычислений неопределенностей по типу *A*. В табл. 4.3 приведены коэффициенты охвата k для различных степеней свободы v_{eff} .

Таблица 4.3

Коэффициенты охвата для различных степеней свободы

ν_{eff}	k_{95}	k_{99}
1	12,706	63,657
2	4,303	9,925
3	3,182	5,841
4	2,776	4,604
5	2,571	4,032
6	2,447	3,707
7	2,365	3,499
8	2,306	3,355
10	2,228	3,169
20	2,086	2,845
60	2,000	2,660
∞	1,960	2,576

При определении стандартной неопределенности по типу B в каждом случае требуется подробное рассмотрение, чтобы избежать недооценки. Если, например, установлены верхняя и нижняя границы изменчивости a_+ и a_- так, что вероятность выхода соответствующей величины за эти границы очень мала, то принимается $\nu_i \rightarrow \infty$.

U рассматривается в Руководстве как параметр интервала, включающего результат измерения, содержащего большую часть распределения вероятностей, и характеризуемый стандартной неопределенностью; p является «вероятностью охвата» или «уровнем доверия» для этого интервала. Расширенная неопределенность (см. табл. 4.1) является аналогом доверительного интервала. Но сам термин «доверительный интервал» применим к интервалу, определяемому U , только в том случае, если все составляющие неопределенности, которые входят в $u_c(y)$, были бы получены оцениванием по типу A .

4.5. Представление конечного результата измерений

Как указывалось выше, неопределенность результата измерений может выражаться суммарной стандартной неопределенностью u_c и расширенной неопределенностью U . При записи численного результата измерений, включающего оценку и неопределенность из-

меряемой величины, рекомендуется применять следующие способы. В качестве примера [17] рассмотрим способы записи результата для эталона массы 100 г.

Если мерой неопределенности результата измерения величины Y является суммарная стандартная неопределенность $u_c(y)$:

1. « $m = 100,02147$ г с суммарной стандартной неопределенностью $u_c = 0,35$ мг»;

или « $m = 100,02147$ г; 0,35 мг»;

или « $m = 100,02147$ г; $3,5 \cdot 10^{-6}$ », где число после «;» без указания единиц величин является относительной стандартной неопределенностью $u_c(y) / |y|$.

2. « $m = 100,02147(35)$ г», где цифры в скобках являются численным значением суммарной стандартной неопределенности u_c , соответствующим последним цифрам приведенного результата (см. табл. 2.2 – Количество вещества).

3. « $m = 100,02147(0,00035)$ г», где число в скобках является численным значением суммарной стандартной неопределенности u_c , выраженной в единицах величины результата измерения;

или « $m = 100,02147$ г (0,35 мг)», где число в скобках являются численным значением суммарной стандартной неопределенности u_c , выраженной в указанных единицах величины;

или « $m = 100,02147$ г ($3,5 \cdot 10^{-6}$)», где число в скобках без указания единиц величин является относительной стандартной неопределенностью $u_c(y) / |y|$.

Если мерой неопределенности результата измерения величины Y является расширенная неопределенность U , то выражать результат следует как $Y = y \pm U$, что означает, что наилучшей оценкой значения, приписываемого измеряемой величине, является y и что в интервале от $y - U$ до $y + U$ содержится большая часть распределения значений, которые можно с достаточным основанием приписать Y . Применительно к рассмотренному выше примеру, форма представления результата измерений будет выглядеть следующим образом:

« $m = 100,02147 \pm 0,00079$ г», где число, следующее за знаком \pm , является численным значением расширенной неопределенности $U = k u_c(y)$, определенной их суммарной стандартной неопределенности $u_c(y) = 0,35$ мг и коэффициента охвата $k = 2,26$ (для $v_{eff} = 9$) и уровня доверия 95 %;

или « $m = 100,02147 \text{ г} \pm 0,00079 \text{ г} (k = 2,26)$ »;

или « $m = 100,02147 \text{ г} \pm 0,79 \text{ мг} (k = 2,26)$ ».

Численные значения оценки и стандартной или расширенной неопределенности не следует давать с избыточным числом цифр. Обычно достаточно привести их с двумя значащими цифрами, если это окончательные результаты. Например, если $m = 10,05762 \text{ г}$ с $u_c(m) = 27,6 \text{ мг}$, то результат округления будет выглядеть так: $m = 10,058(28) \text{ г}$.

В целом при округлении конечного результата измерений можно руководствоваться теми же принципами, что используются в классической теории погрешностей (см. раздел 3.5).

Часть II. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ. ДОПУСКИ

В практике строительства важнейшими показателями качества выполненных работ, наряду с прочностными характеристиками конструкционных материалов, является обеспечение заданных проектных геометрических параметров. Это относится как к отдельным элементам конструкций, так и к сборным конструкциям, и ко всему объекту в целом. В Республике Беларусь нормативную основу системы обеспечения точности геометрических параметров в строительстве в настоящее время составляют следующие документы:

ГОСТ 21778–81 «Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Основные положения» [6];

СТБ 1921–2008 «Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Расчет точности» [35];

СТБ 1942–2009 «Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Функциональные допуски» [36];

СТБ 1941–2009 «Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Технологические допуски» [37];

ГОСТ 23616–79 «Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Контроль точности» [7].

СТБ 1923–2008 «Система обеспечения точности геометрических показателей в строительстве. Статистический анализ точности» [38];

ГОСТ 26433.0–85 «Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Правила выполнения измерений. Общие положения» [8].

5.1. Термины и определения

Собираемость конструкций – свойство независимо изготовленных элементов обеспечивать возможность сборки из них конструкций зданий и сооружений с точностью их геометрических параметров, соответствующей предъявляемым к конструкциям эксплуатационным требованиям. Количественной характеристикой собираемости является уровень собираемости, который оценивают долей сборочных работ, выполняемых без дополнительных операций по подбору, пригонке или регулированию параметров элементов.

Взаимозаменяемость элементов – в системе обеспечения точности геометрических параметров в строительстве – свойство независимо изготовленных однотипных элементов обеспечивать возможность применения одного из них вместо другого без дополнительной обработки при заданном уровне собираемости конструкции. Взаимозаменяемость элементов достигается соблюдением единых требований к точности их геометрических параметров.

Точность геометрического параметра – степень приближения действительного значения геометрического параметра к его номинальному значению.

Геометрический параметр – линейная или угловая величина.

Размер – числовое значение линейной величины в выбранных единицах измерения.

*Номинальное значение*³⁵ геометрического параметра (номинальный размер для линейной величины) – значение геометрического параметра, заданное в проекте и являющееся началом отсчета отклонений.

Действительное значение геометрического параметра (действительный размер) – значение геометрического параметра, установленное в результате измерения с определенной точностью.

³⁵ В некоторых нормативных документах вместо термина «Номинальное значение геометрического параметра» применяют термин «Базисное значение геометрического параметра».

Предельные значения геометрического параметра (предельные размеры) – значения геометрического параметра, между которыми должны находиться его действительные значения с определенной вероятностью.

Допуск – абсолютное значение разности предельных значений геометрического параметра.

Поле допуска – совокупность значений геометрического параметра, ограниченная его предельными значениями.

Действительное отклонение геометрического параметра (действительное отклонение размера) – алгебраическая разность между действительным и номинальным значениями геометрического параметра.

Систематическое отклонение геометрического параметра (систематическое отклонение размера) – разность между средним и номинальным значениями геометрического параметра.

Предельное отклонение геометрического параметра (предельное отклонение размера) – алгебраическая разность между предельным и номинальным значениями геометрического параметра.

Верхнее предельное отклонение геометрического параметра (верхнее предельное отклонение размера) – алгебраическая разность между наибольшим предельным и номинальным значениями геометрического параметра.

Нижнее предельное отклонение геометрического параметра (нижнее предельное отклонение размера) – алгебраическая разность между наименьшим предельным и номинальным значениями геометрического параметра.

Отклонение середины поля допуска – алгебраическая разность между серединой поля допуска и номинальным значением геометрического параметра.

5.2. Характеристики точности

Ниже рассмотрены характеристики точности геометрических параметров в соответствии с ГОСТ 21778–81. Используемая терминология опирается на базовые понятия классической теории точности: действительное значение величины, точность определения величины, систематические и случайные погрешности.

Точность геометрического параметра x , представляющего собой случайную величину, определяют характеристиками точности. При

этом точность угловых величин может быть охарактеризована точностью линейных размеров, которыми определяются эти величины.

Характеристики точности геометрических параметров в строительстве и их взаимосвязь указаны на рис. 5.1.

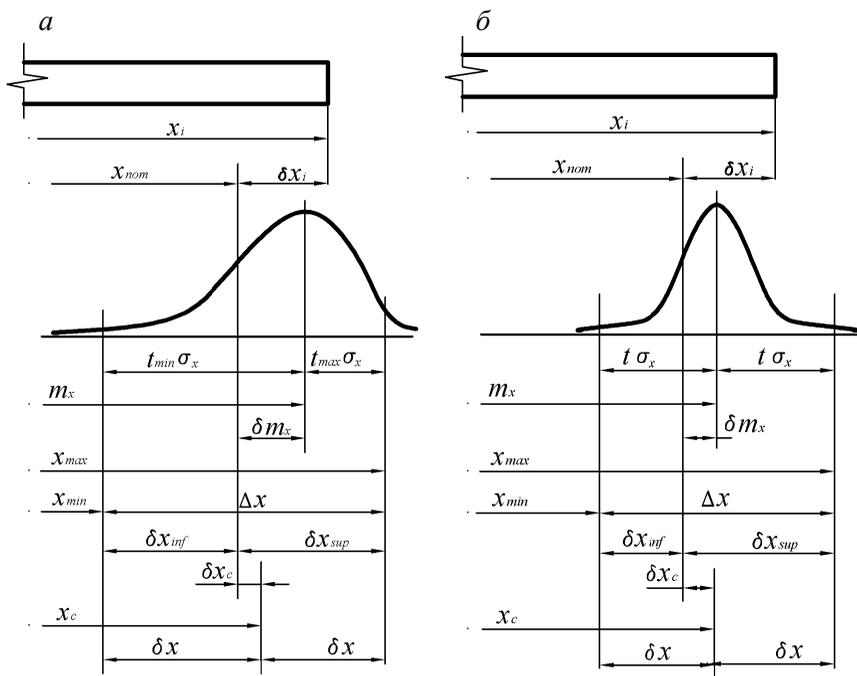


Рис. 5.1. Характеристики точности геометрических параметров:
 а – в общем случае; б – при нормальном распределении отклонений

Действительные значения геометрического параметра могут отклоняться от номинальных как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Точность геометрического параметра x в каждом отдельном случае характеризуется значением действительного отклонения δx_i , выражаемого зависимостью

$$\delta x_i = x_i - x_{nom}, \quad (5.1)$$

где x_i – действительное значение параметра x ;

x_{nom} – номинальное значение параметра.

Действительное отклонение δx_i является количественным выражением систематических и случайных погрешностей, накопленных при выполнении технологических операций и измерений.

Точность геометрических параметров в стандартах и других нормативных документах, а также на рабочих чертежах, характеризуется минимальным x_{\min} и максимальным x_{\max} предельными размерами, нижним δx_{\inf} и верхним δx_{\sup} ³⁶ предельными отклонениями от номинального x_{nom} значения, допуском Δx и отклонением δx_c середины поля допуска x_c от номинального x_{nom} значения параметра x . Половина допуска $\delta x = \Delta x/2$ является предельным отклонением параметра x от середины поля допуска x_c . Взаимосвязь между этими характеристиками точности определяют по формулам:

$$x_{\min} = x_{\text{nom}} + \delta x_{\inf} = x_c - \delta x; \quad (5.2)$$

$$x_{\max} = x_{\text{nom}} + \delta x_{\sup} = x_c + \delta x; \quad (5.3)$$

$$\Delta x = 2\delta x = x_{\max} - x_{\min} = \delta x_{\sup} - \delta x_{\inf}; \quad (5.4)$$

$$\delta x_c = x_c - x_{\text{nom}} = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2} - x_{\text{nom}} = \frac{\delta x_{\sup} - \delta x_{\inf}}{2}. \quad (5.5)$$

Точность геометрического параметра X в совокупности его действительных значений x_i , полученной в результате выполнения определенного технологического процесса или операции массового и серийного производства, определяют статистическими характеристиками точности. В качестве статистических характеристик точности геометрического параметра применяют его среднее значение m_x и среднее квадратическое отклонение σ_x . В необходимых случаях при различных законах распределения параметра X допускается использовать другие статистические характеристики точности.

При нормальном распределении геометрического параметра X оценками характеристик m_x и σ_x являются выборочное среднее x_m и выборочное среднее квадратическое отклонение s_x , которые вычисляют по формулам:

³⁶ *Примечание.* Значения нижнего и верхнего предельных отклонений δx_{\sup} и δx_{\inf} подставляются в формулы со своими знаками.

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (5.6)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n - 1}}, \quad (5.7)$$

где n – объем выборки.

Систематическое отклонение δm_x геометрического параметра X определяют по формуле

$$\delta m_x = m_x - x_{nom}. \quad (5.8)$$

Оценкой систематического отклонения Δm_x при нормальном распределении геометрического параметра является выборочное среднее отклонение Δx_m , то есть среднее значение отклонений в выборке, определяемое по формуле

$$\delta x_m = x_m - x_{nom}. \quad (5.9)$$

Предельные значения x_{\min} и x_{\max} устанавливают как значения геометрического параметра x , отвечающие определенным вероятностям появления значений этого геометрического параметра X ниже x_{\min} и выше x_{\max} . Взаимосвязь предельных значений x_{\min} и x_{\max} и статистических характеристик точности m_x и σ_x представлена формулами:

$$x_{\min} = m_x - t_{\min} \sigma_x; \quad (5.10)$$

$$x_{\max} = m_x + t_{\max} \sigma_x, \quad (5.11)$$

где t_{\min} и t_{\max} – значения стандартизованной случайной величины, зависящие от вероятности появления значений ниже x_{\min} и выше x_{\max} и типа статистического распределения параметра x . Как правило, вероятность появления значений x ниже x_{\min} и выше x_{\max} принимают одинаковой, но не более 0,05.

В случае симметричного (например, нормального) распределения геометрического параметра x (рис. 5.1, б) и одинаковой вероят-

ности появления значений x ниже x_{\min} и выше x_{\max} взаимосвязь между характеристиками точности выражается формулами:

$$x_c = m_x; \quad (5.12)$$

$$x_{\min} = x_{nom} + \delta x_c - \delta x; \quad (5.13)$$

$$x_{\max} = x_{nom} + \delta x_c + \delta x. \quad (5.14)$$

Если при этом среднее значение m_x параметра практически не отличается от его номинального значения x_{nom} , то взаимосвязь характеристик точности характеризуют формулы:

$$\delta x_c = \delta m_x = 0; \quad (5.15)$$

$$\delta x_{inf} = \delta x_{sup} = \delta x; \quad (5.16)$$

$$x_{\min} = x_{nom} - \delta x; \quad (5.17)$$

$$x_{\max} = x_{nom} + \delta x. \quad (5.18)$$

5.3. Допуски функциональные

С понятиями погрешности, неопределенности, доверительного интервала близко связано понятие допуска. Если доверительный интервал является показателем качества процесса измерения, то допуск является количественным критерием качества протекания того или иного технологического процесса. Аналогично доверительному интервалу, допуск определяется своими границами, в пределах которых любое значение параметра считается допустимым. Чем уже границы допуска для технологического параметра, тем выше степень повторяемость процесса и, в итоге, качество конечной продукции. Но, с другой стороны, если допуск установить слишком узким, то фактическое значение параметра может либо не «вписаться» в границы допуска, либо для этого могут потребоваться дополнительные затраты: более дорогое оборудование, квалификация работников, дополнительное время. Поэтому выбор обоснованных допусков при возведении строительных конструкций зданий, сооружений и изгото-

товлении их элементов является компромиссом между достижением минимума трудовых и материальных затрат и качеством выполненных строительных работ.

Функциональный допуск – допуск геометрического параметра, устанавливающий точность изготовленной или собранной из элементов конструкции, исходя из условия обеспечения предъявляемых к ней функциональных требований. Говоря иначе, это допуск, при котором конструкция, конструкционный узел или элемент конструкции выполняют свои функции. Функциональными допусками регламентируют точность размеров, формы и положения элементов зданий и сооружений. Функциональный допуск рекомендуется определять по формуле (5.4) как предельные отклонения величины от ее номинального значения. Номенклатура функциональных допусков геометрических параметров устанавливается СТБ 1942–2009 (прил. Б, табл. Б1). В указанном стандарте применяют следующие термины:

– *функциональный геометрический параметр* – геометрический параметр, точность которого непосредственно влияет на эксплуатационные показатели здания, сооружения или их элемента;

– *функциональное предельное отклонение* – предельное отклонение геометрического параметра, точность которого непосредственно влияет на эксплуатационные показатели здания, сооружения или их элемента.

Порядок назначения функциональных допусков по СТБ 1942–2009

{5.1}³⁷ Функциональные допуски Δx_f , функциональные предельные отклонения или предельные значения функциональных геометрических параметров, которыми в соответствии с ГОСТ 21778 регламентируется точность этих параметров на стадии проектирования, назначают исходя из предъявляемых к строительным конструкциям функциональных требований.

{5.2} Функциональные требования по уровню надежности строительных конструкций, а также конструктивные, технологические, эстетические, экономические и другие требования, принимаемые для назначения допусков, должны обеспечивать соблюдение эксплуатационных показателей зданий, сооружений и их элементов в допустимых пределах.

³⁷ Нумерация пунктов, обозначения величин и их наименования в разделе 5.3 соответствуют СТБ 1942–2009 [36].

{5.3} Функциональные допуски рассматриваются как компенсаторы технологических погрешностей, и возможность обеспечения принимаемых значений этих допусков должна проверяться на стадии проектирования расчетом точности геометрических параметров зданий, сооружений и их элементов в соответствии с ГОСТ 21780.

{5.4} В зависимости от учитываемой в расчете точности допускаемой вероятности появления действительных значений $x_{i,f}$ функционального геометрического параметра x_f ниже минимального $x_{\min,f}$ или выше максимального значения $x_{\max,f}$ при назначении функциональных допусков устанавливают соответствующие им значения стандартизированной случайной величины $t_{\min,f}$ и $t_{\max,f}$, приведенные в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Допускаемая вероятность появления действительных значений $x_{i,f}$ ниже $x_{\min,f}$ или выше $x_{\max,f}$, %	0,13	0,75	2,0	5,0
$t_{\min,f}$ и $t_{\max,f}$	3,0	2,4	2,1	1,6

{5.5} Допускаемую вероятность появления действительных значений $x_{i,f}$ функционального геометрического параметра x_f ниже $x_{\min,f}$ или выше $x_{\max,f}$, то есть в случаях, когда $x_{i,f} < x_{\min,f}$ или $x_{i,f} > x_{\max,f}$, принимают исходя из социальных или экономических последствий отказа строительных конструкций здания, сооружения или их элемента.

{5.6} Значения функциональных допусков принимают в соответствии с числовым рядом по ГОСТ 21778.

{5.7} При назначении функциональных допусков и предельных отклонений необходимо указывать способы и условия измерения функциональных геометрических параметров.

5.4. Допуски технологические

Технологический допуск – допуск геометрического параметра, устанавливающий точность выполнения соответствующего технологического процесса или операции. Технологические допуски уста-

навливают точность технологических процессов и операций по изготовлению и установке элементов в проектное положение, выполнению разбивочных работ. С той или иной конструкцией может производиться последовательность технологических операций, у каждой из которых есть свой технологический допуск для одного и того же параметра. Очевидно, что статистическая сумма всех технологических допусков для этого параметра должна укладываться в границы его функционального допуска для данной конструкции. Это значит, что технологические допуски всегда более узкие, чем функциональные. Основные принципы регламентации, номенклатуру и значения технологических допусков геометрических параметров устанавливает СТБ 1941–2009.

Границы интервалов номинальных размеров, для которых установлены технологические допуски, принимаются на основе рядов предпочтительных чисел, установленных ГОСТ 6636. При этом значения технологических допусков Δx , в миллиметрах, вычислены по формуле

$$\Delta x = iK,$$

где i – единица допуска, определяемая в зависимости от значения нормируемого геометрического параметра по формулам табл. 5.2;

K – коэффициент точности, устанавливающий число единиц допуска для данного класса точности.

Класс точности – совокупность значений технологических допусков, зависящих от номинальных значений геометрических параметров.

Каждый класс точности содержит ряд допусков, соответствующих одинаковой степени точности для всех номинальных значений данного геометрического параметра.

Значения допусков в миллиметрах или угловых величинах должны соответствовать числовому ряду: 1; 1,6; 2,4; 4; 6; 10 или 1; 1,2; 1,6; 2; 2,4; 3; 4; 5; 6; 8; 10. Каждое число ряда допускается увеличивать или уменьшать умножением его на десять с показателем степени, равным целому числу.

В соответствии с требованиями стандартов системы обеспечения точности геометрических параметров в строительстве во вновь разрабатываемых и пересматриваемых стандартах и других нормативно-технических документах на конкретные элементы и конструкции

зданий и сооружений, на рабочих чертежах и в технологической документации устанавливают требования к точности конструкций, их элементов и выполнения работ, а также методы и средства технологического обеспечения и контроля точности.

Таблица 5.2

Виды технологических допусков и формулы вычислений
единицы допуска (по СТБ 1941–2009)

Характеристика технологического процесса или операции	Вид допуска геометрического параметра	Формула для вычисления	Значение α
Изготовление	Допуск линейного размера.	$i = \alpha_i (0,8 + 0,001\sqrt{L}) \times$ $\times (\sqrt[3]{L + 25}) + 0,01\sqrt[3]{L^2},$ где L – в миллиметрах	1,0
	Допуск прямолинейности.		1,0
	Допуск плоскостности.		1,0
	Допуск перпендикулярности.		0,6
	Допуск равенства диагоналей		1,0
Разбивка	Допуск разбивки точек и осей в плане.	$i = \alpha_i L,$ где L – в метрах	1,0
	Допуск передачи точек и осей по вертикали.		0,4
	Допуск створности точек.		0,25
	Допуск разбивки высотных отметок.		0,6
	Допуск передачи высотных отметок.		0,25
	Допуск перпендикулярности осей		0,4
	Установка (монтаж)		Допуск совмещения ориентиров.
Допуск симметричности установки		0,6	

Точность изготовления элементов

{5.1}³⁸ Точность изготовления элементов характеризуют допусками и предельными отклонениями их линейных размеров (рис. 5.2, рис. 5.3), формы и взаимного положения поверхностей.

Допуски и предельные отклонения формы и взаимного положения поверхностей устанавливают, если требуется ограничить искажения формы элементов, не выявляемые при контроле точности линейных размеров. При этом точность формы поверхностей призматических прямоугольных элементов характеризуют допуском прямолинейности и предельными отклонениями от прямолинейности (рис. 5.3) и допуском плоскостности и предельными отклонениями от плоскостности (рис. 5.4), точность взаимного положения поверхностей этих элементов – допуском перпендикулярности и предельными отклонениями от перпендикулярности (рис. 5.5).

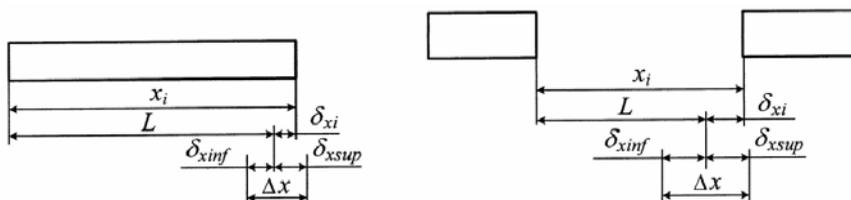


Рис. 5.2. Допуск и отклонение от линейных размеров элементов

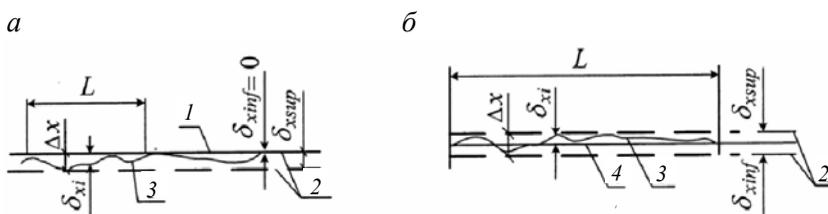


Рис. 5.3. Допуск прямолинейности и отклонение от прямолинейности:

a – допуск прямолинейности и предельные отклонения от прямолинейности на заданной длине; *б* – допуск прямолинейности и предельные отклонения от прямолинейности на всей длине;

1 – условная (прилегающая) прямая; *2* – прямые, ограничивающие поля допуска;

3 – реальный профиль; *4* – условная (проходящая через крайние точки) прямая

³⁸ Нумерация пунктов, обозначения величин и их наименования в разделе 5.4 соответствуют СТБ 1941–2009 [37].

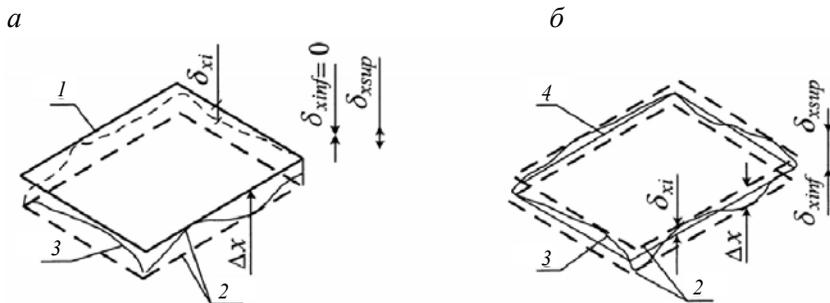
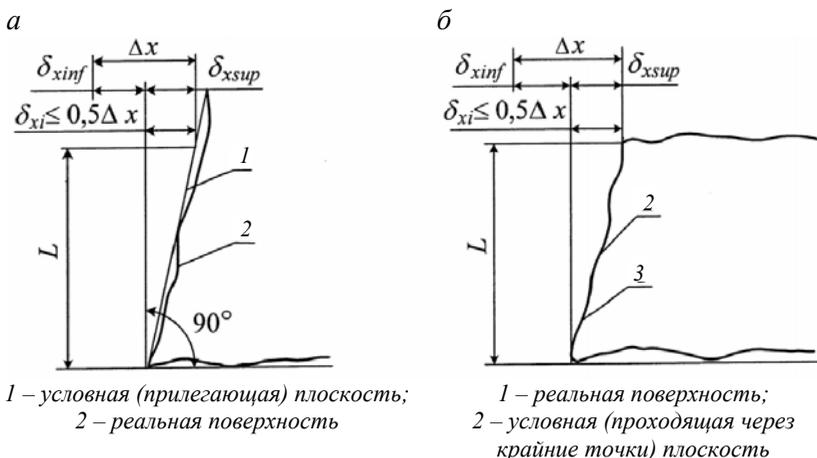


Рис. 5.4. Допуск плоскостности и отклонение от плоскостности:
a – допуск плоскостности и предельные отклонения от плоскостности при измерениях от прилегающей плоскости; *б* – допуск плоскостности и предельные отклонения от плоскостности при измерениях от условной плоскости, проходящей через три крайние точки реальной поверхности;
 1 – условная (прилегающая) плоскость; 2 – плоскости, ограничивающие поле допуска; 3 – реальная поверхность; 4 – условная (проходящая через три крайние точки) плоскость



a – условная (прилегающая) плоскость;
 2 – реальная поверхность

б – реальная поверхность;
 2 – условная (проходящая через крайние точки) плоскость

Рис. 5.5. Допуск перпендикулярности:

a – допуск перпендикулярности и предельные отклонения от перпендикулярности при измерениях на заданной длине; *б* – допуск перпендикулярности и предельные отклонения от перпендикулярности при измерениях на всей длине

{5.2} Допуски линейных размеров элементов регламентируют точность их изготовления по длине, ширине, высоте, толщине или диаметру, точность размеров и положения выступов, выемок, от-

верстий, проемов, крепежных и соединительных деталей, а также точность положения наносимых на элементы ориентиров. Эти допуски принимают по прил. В табл. В1 в зависимости от номинального размера L , точность которого нормируют.

{5.3} Допуски прямолинейности принимают по прил. В табл. В2 для рассматриваемых сечений элемента на всю длину элемента или на заданной длине в зависимости от номинального значения этого размера. Значения заданной длины выбирают из ряда: 400, 600, 1000, 1600 и 2500 мм.

{5.4} Допуски плоскостности принимают по прил. В табл. В2 для всей рассматриваемой поверхности элемента в зависимости от большего номинального размера L поверхности элемента.

{5.5} Допуски перпендикулярности рассматриваемых поверхностей элемента принимают по прил. В табл. В3 в зависимости от меньшего номинального размера L поверхностей, перпендикулярность которых регламентируют, или заданной длины в сечении элемента. Значения заданной длины выбирают из ряда: 400, 500, 600, 800 и 1000 мм.

Для крупноразмерных элементов перпендикулярность их поверхностей допускается регламентировать допусками равенства диагоналей, значения которых принимаются по прил. В табл. В4 в зависимости от большего номинального размера L поверхности, для которой назначают разность диагоналей.

{5.6} Допусками прямолинейности, плоскостности и перпендикулярности поверхностей следует также регламентировать точность формы и взаимного положения отдельных поверхностей простых непрямоугольных элементов.

Точность размеров, формы и взаимного положения поверхностей элементов, имеющих сложное очертание, регламентируют допусками линейных размеров, определяющих положение характерных точек этих элементов в принятой системе координат.

Точность разбивочных работ

{6.1} Точность разбивочных работ характеризуют допусками и предельными отклонениями разбивки точек и осей в плане (рис. 5.6) и передачи точек и осей по вертикали (рис. 5.7), допусками створности и предельными отклонениями от створности точек (рис. 5.8), допусками и предельными отклонениями разбивки высотных отметок (рис. 5.9) и передачи высотных отметок (рис. 5.10), а также до-

пусками перпендикулярности и предельными отклонениями от перпендикулярности осей (рис. 5.11).

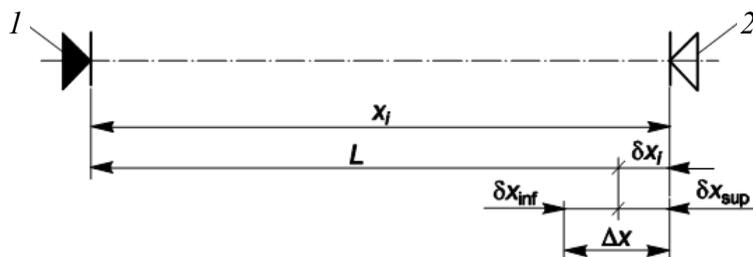


Рис. 5.6. Допуск и предельные отклонения разбивки точек и осей в плане:
 1 – ориентир, принимаемый за начало отсчета;
 2 – ориентир, устанавливаемый в результате разбивки

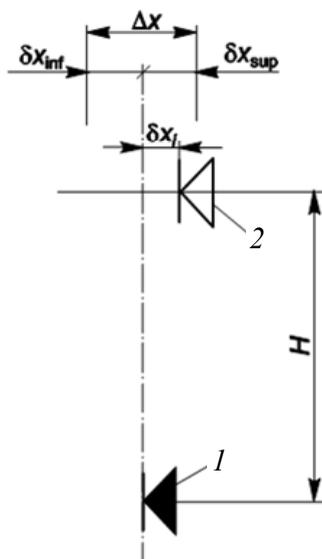


Рис. 5.7. Допуск и предельные отклонения передачи точек и осей по вертикали:
 1 – ориентир, принимаемый за начало отсчета;
 2 – ориентир, устанавливаемый в результате передачи

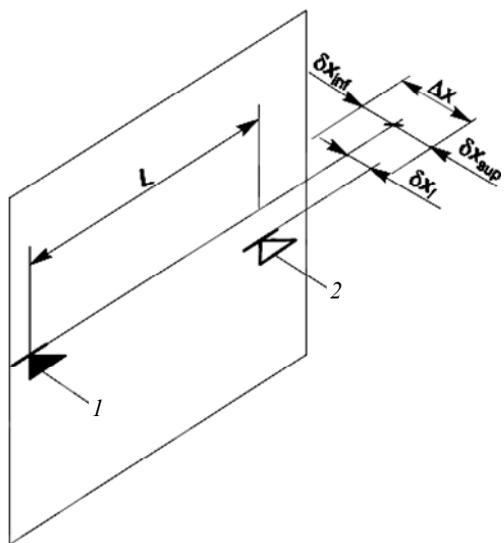


Рис. 5.8. Допуск створности и предельные отклонения от створности точек:
 1 – ориентир, принимаемый за начало отсчета;
 2 – ориентир, устанавливаемый в результате разбивки

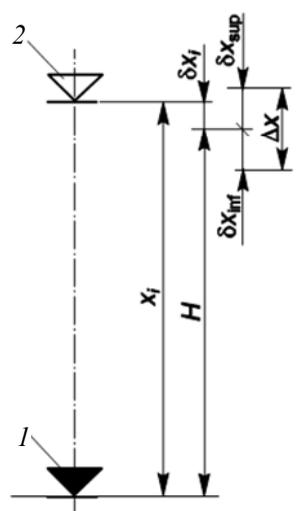


Рис. 5.9. Допуск и предельные отклонения разбивки высотных отметок:
 1 – ориентир, принимаемый за начало отсчета;
 2 – ориентир, устанавливаемый в результате разбивки

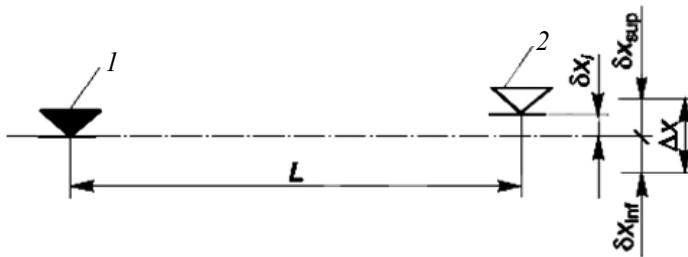


Рис. 5.10. Допуск и предельные отклонения передачи высотных отметок:
 1 – ориентир, принимаемый за начало отсчета;
 2 – ориентир, устанавливаемый в результате передачи

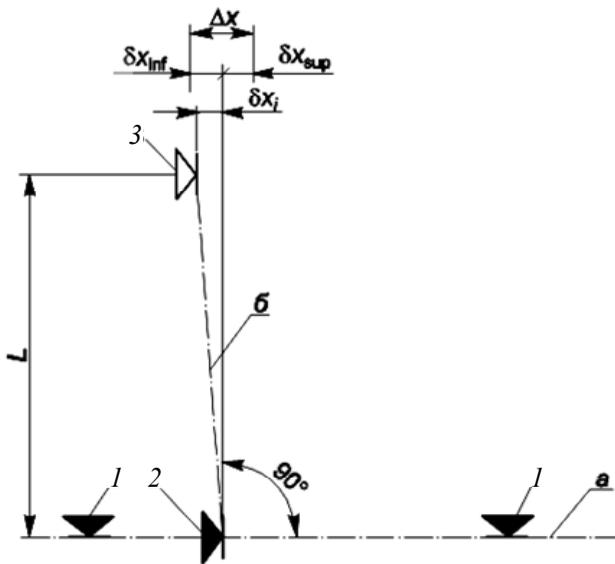


Рис. 5.11. Допуск перпендикулярности и предельные отклонения от перпендикулярности осей:
 1 – ориентиры, определяющие положение оси *a*;
 2 – ориентир, принимаемый за начало отсчета при разбивке оси *б*;
 3 – ориентир, устанавливаемый при разбивке оси *б*

{6.2} Допуски разбивки точек и осей в плане принимают по прил. В табл. В5 в зависимости от номинального расстояния L , точность которого нормируют.

{6.3} Допуски передачи точек и осей по вертикали принимают по прил. В табл. В6 в зависимости от номинального расстояния H между горизонтами.

{6.4} Допуски створности точек принимают по прил. В табл. В6 в зависимости от номинальной длины L разбиваемой оси.

{6.5} Допуски разбивки высотных отметок принимают по прил. В табл. В7 в зависимости от номинального расстояния H между горизонтами.

{6.6} Допуски передачи высотных отметок принимают по прил. В табл. В7 в зависимости от номинального расстояния L до рассматриваемой высотной отметки.

{6.7} Допуски перпендикулярности осей принимают по прил. В табл. В7 в зависимости от номинального расстояния L до рассматриваемой точки. При номинальном значении угла между осями, не равном 90° , допуски угла также принимают по прил. В табл. В7 в зависимости от номинального расстояния L до рассматриваемой точки.

{6.8} Допуски разбивочных работ в прил. В табл. В5–В7 даны с учетом точности нанесения и закрепления соответствующих точек и осей.

{7} *Точность строительных и монтажных работ*

{7.1} Точность геометрических параметров зданий, сооружений и их элементов, возводимых из мелкоразмерных, монолитных и сыпучих материалов, и точность выполнения земляных работ устанавливаются в соответствии с разделом 5.2.

{7.2} Точность установки элементов сборных зданий и сооружений характеризуют допусками совмещения и отклонениями от совмещения ориентиров (точек, линий, поверхностей) (рис. 5.12) и допусками симметричности и предельными отклонениями от симметричности установки элементов (рис. 5.13).

{7.3} Допуски совмещения ориентиров принимают по прил. В табл. В8 в зависимости от номинального расстояния L между ними.

{7.4} Допуски симметричности установки элементов принимают по прил. В табл. В9 в зависимости от номинального значения геометрического параметра L .

{7.5} Допуски строительных и монтажных работ в прил. В табл. В8 и В9 характеризуют точность установки элементов после проектного закрепления. Точность установки элементов при временном закреплении в зависимости от способа закрепления следует принимать на 1–2 класса выше.

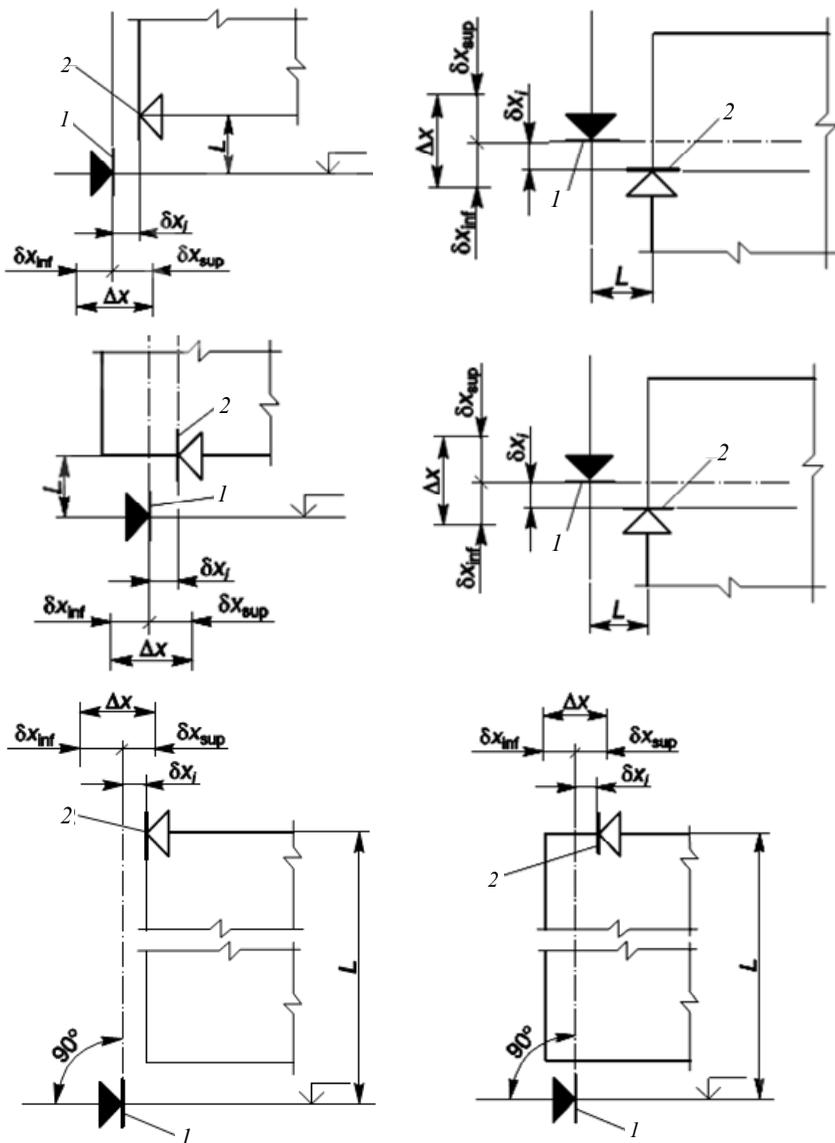


Рис. 5.12. Допуски совмещения и предельные отклонения от совмещения ориентиров:

1 – ориентир, принимаемый за начало отсчета;
 2 – ориентир устанавливаемого элемента

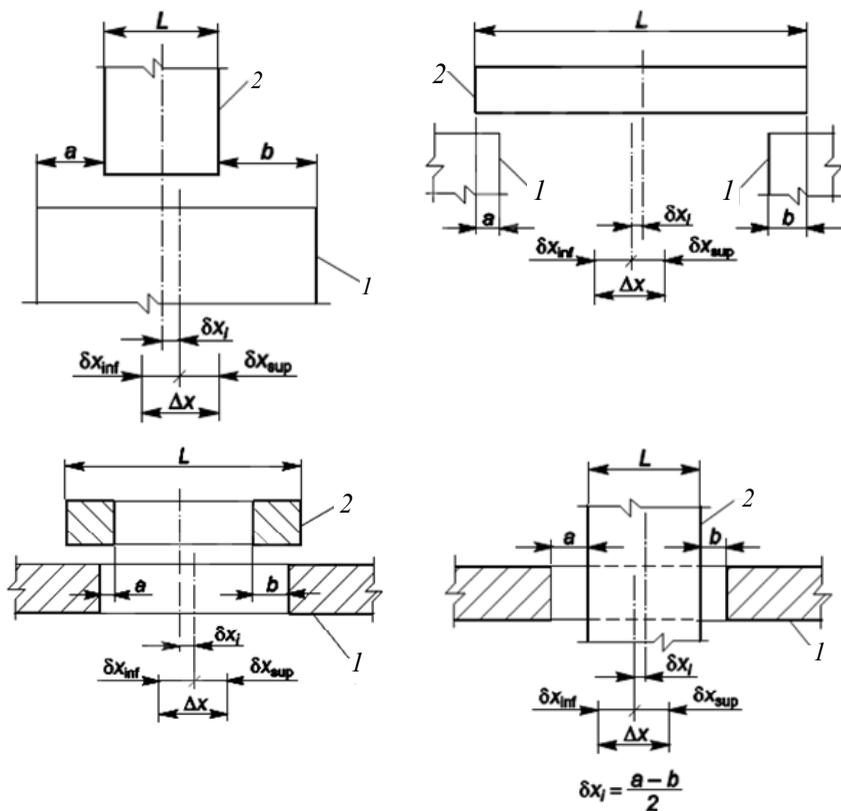


Рис. 5.13. Допуски симметричности и предельные отклонения от симметричности установки элементов:

1 – установленный элемент; 2 – устанавливаемый элемент

5.5. Расчет точности геометрических параметров

Практически любой технологический параметр является следствием проявления других технологических параметров. В этом случае можно говорить о результирующем и составляющих параметрах. По СТБ 1921–2008 *результирующий параметр* – это параметр, входящий в расчетную схему и зависящий от ряда составляющих параметров; *составляющий параметр* – параметр, получаемый непосредственно при выполнении определенного технологического процесса или операции и входящий в расчетную схему.

Расчетная схема – графическое изображение связей между результирующими и составляющими геометрическими параметрами, в которых учитываются конструктивно технологические особенности зданий, сооружений и их элементов, в том числе способы и последовательность выполнения технологических процессов и операций.

Расчет точности геометрических параметров выполняется в процессе проектирования типовых, экспериментальных и индивидуальных конструкций зданий и сооружений и их элементов с целью обеспечения собираемости конструкций с заданными эксплуатационными свойствами при наименьших затратах.

Расчет точности производят на основе:

- функциональных требований, предъявляемых к строительным конструкциям зданий и сооружений;
- данных о точности применяемых технологических процессов и операций изготовления элементов, разбивки осей и сборки конструкций.

В процессе расчета точности в соответствии с принятой расчетной схемой по характеристикам точности составляющих геометрических параметров определяют расчетные предельные значения результирующего параметра, которые сравнивают затем с допустимыми предельными значениями этого параметра, установленными на основе функциональных требований. Соответствие точности результирующего параметра функциональным требованиям обеспечивается, если соблюдены следующие условия:

$$x_{\max} \leq x_{\max,f}; \quad (5.19)$$

$$x_{\min} \geq x_{\min,f}; \quad (5.20)$$

где x_{\min} и x_{\max} – расчетные предельные значения результирующего параметра x ;

$x_{\min,f}$ и $x_{\max,f}$ – допустимые предельные значения результирующего параметра x ; разность $x_{\min,f}$ и $x_{\max,f}$ является функциональным допуском $\Delta x_{\max,f}$.

Задача расчета точности может быть:

- прямой, когда расчетные предельные значения результирующего параметра определяют по известным характеристикам точности составляющих параметров (проверочный расчет);

– обратной, когда по установленным допустимым предельным значениям результирующего параметра определяют необходимые требования к точности составляющих параметров.

В зависимости от результатов расчета точности:

– в технической документации на строительные конструкции зданий, сооружений и их элементов и в рабочих чертежах уточняют при необходимости номинальные значения результирующих и составляющих параметров, устанавливают требования к точности этих параметров и правила контроля точности;

– в технологической документации на изготовление элементов, разбивку осей и производство строительно-монтажных работ устанавливают способы и последовательность выполнения технологических процессов и операций, методы и средства обеспечения их точности.

Методические принципы расчета точности

Принимаемые в результате расчета точности решения должны обеспечивать минимальные трудовые и материальные затраты при возведении строительных конструкций зданий и сооружений и изготовлении их элементов. С этой целью следует предусматривать максимально возможные значения допусков, а также конструктивные и технологические мероприятия по снижению влияния точности технологических процессов и операций на точность результирующих параметров.

Расчет точности следует производить, как правило, из условия полной собираемости конструкций. В некоторых случаях при технической возможности и экономической целесообразности может предусматриваться неполная собираемость. При этом для случаев, когда действительные значения результирующего параметра будут выходить за пределы, должны предусматриваться дополнительные операции по подбору элементов или пригонке отдельных размеров.

Зависимость между результирующим и составляющими параметрами, входящими в расчетную схему, выражается уравнением

$$x = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n = \sum_{k=1}^n c_kx_k, \quad (5.21)$$

где x – результирующий параметр;

x_k – составляющий параметр;

n – число составляющих параметров в расчетной схеме;

c_k – коэффициент, характеризующий геометрическую зависимость результирующего параметра x от составляющего параметра x_k и метода сборки конструкции.

В качестве результирующих параметров при составлении расчетных схем, как правило, рассматриваются размеры в узлах соединений элементов и другие размеры, которыми, при принятой последовательности сборки конструкции, завершается определенный цикл технологических операций, определяющих точность составляющих параметров, и в которых компенсируются погрешности этих операций. Основные виды результирующих параметров приведены в прил. Г.

В качестве составляющих параметров рассматриваются размеры элементов, размеры, определяющие расстояния между осями, высотными отметками и другими ориентирами, а также другие параметры, получаемые в результате выполнения указанных технологических операций, точность которых влияет на точность результирующего параметра.

Если составляющие геометрические параметры статистически зависимы, то при определении расчетных характеристик точности результирующего параметра эта зависимость должна быть учтена. Статистическую зависимость допускается характеризовать коэффициентом корреляции.

Расчет точности производят на основе статистических методов. В общем случае при статистическом расчете расчетные предельные значения результирующего параметра x_{\min} и x_{\max} для проверки условий (5.19) и (5.20) определяют по следующим формулам:

$$x_{\min} = x_{\text{nom}} + \delta m_x - t_{\min, f} \sigma_x, \quad (5.22)$$

$$x_{\max} = x_{\text{nom}} + \delta m_x + t_{\max, f} \sigma_x, \quad (5.23)$$

где x_{nom} – номинальное значение результирующего параметра x ;

δm_x – систематическое отклонение результирующего параметра x ;

σ_x – среднеквадратичное отклонение результирующего параметра x ;

$t_{\min, f}$ и $t_{\max, f}$ – показатели, зависящие от допускаемой вероятности появления значений результирующего параметра ниже $x_{\min, f}$ и выше $x_{\max, f}$.

В общем случае – для статистического расчета – характеристики точности δm_x и σ_x определяют по формулам

$$\delta m_x = \sum_{k=1}^n c_k \cdot \delta m_{x,k}; \quad (5.24)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{k=1}^n c_k^2 \cdot \sigma_{x,k}^2}. \quad (5.25)$$

Номинальные значения и расчетные характеристики точности результирующего параметра при статистически независимых составляющих параметрах определяют на основе исходного условия (5.21) по следующим формулам:

$$x_{nom} = \sum_{k=1}^n c_k \cdot x_{k,nom}; \quad (5.26)$$

$$\delta x_c = \sum_{k=1}^n c_k \cdot \delta x_{k,c}; \quad (5.27)$$

$$\Delta x = \sqrt{\sum_{k=1}^n c_k^2 \cdot \Delta x_k^2}, \quad (5.28)$$

где $x_{k,nom}$ – номинальные значения составляющих параметров;

$\delta x_{k,c}$ – отклонение середины поля технологических допусков составляющих параметров;

Δx_k – технологические допуски составляющих параметров.

Характеристики точности δm_x и σ_x в зависимости от имеющихся для расчета исходных данных следует определять по результатам статистического анализа точности соответствующих технологических процессов и операций или по характеристикам точности и планам контроля, установленным в соответствующих ТНПА. Для перехода от характеристик точности и планов контроля, устанавливаемых ТНПА, к статистическим характеристикам точности применяют выражения:

$$\delta m_x = \delta x_{k,c}; \quad (5.29)$$

$$\sigma_{x,k} = \frac{\Delta x_k}{2t_k}, \quad (5.30)$$

где t_k – значение стандартизованной случайной величины, характеризующее приемочный уровень дефектности плана контроля точности составляющего параметра x_k (по ГОСТ 23616).

Значения величин $t_{\max,f}$ и $t_{\min,f}$ в формулах (5.22) и (5.23), а также значения t_k для каждого составляющего параметра, определяют по табл. 5.3 в зависимости соответственно от принимаемого при расчете уровня собираемости и приемочного уровня дефектности установленного плана контроля точности составляющего параметра³⁹.

Таблица 5.3

Значения параметра t

Уровень собираемости конструкции, %	99,73	98,5	96,0	90,0
Приемочный уровень дефектности, %	0,25	1,5	4,0	10,0
Значение t	3	2,4	2,1	1,6

При небольшом числе составляющих параметров (до трех) и отсутствии данных о статистических характеристиках их распределения СТБ 1921–2008 допускает для определения расчетных предельных значений результирующего параметра использование метода «минимума–максимума». В этом случае предельные значения x_{\min} и x_{\max} результирующего параметра x определяют по формулам

$$x_{\min} = x_{nom} + \delta x_c - \Delta x/2; \quad (5.31)$$

$$x_{\max} = x_{nom} + \delta x_c + \Delta x/2, \quad (5.32)$$

³⁹ Значения параметра t для указанных уровней собираемости конструкции совпадают со значениями коэффициента Стьюдента для соответствующих значений доверительной вероятности.

где δx_c – расчетное отклонение середины поля допуска результирующего параметра;

Δx – расчетный допуск результирующего параметра.

Расчетное значение допуска результирующего параметра определяют с учетом наиболее неблагоприятного сочетания отклонений составляющих параметров по формуле, составленной на основе исходной формулы (5.21):

$$\Delta x = \sum_{k=1}^n |c_k| \cdot \Delta x_k, \quad (5.33)$$

где Δx_k – допуск составляющего параметра x_k ;

c_k – коэффициент, характеризующий геометрическую зависимость результирующего параметра x от составляющего параметра x_k и метода сборки конструкции.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА МЕХАНИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ИСПЫТАНИЙ

В качестве основного показателя прочности конструкционного бетона принят *предел кратковременной прочности*, определяемый как максимальное напряжение в испытательном бетонном образце при его одноосном сжатии. Несмотря на то, что такой параметр является общепринятым в строительном производстве, считать его исчерпывающей прочностной характеристикой бетона нельзя. Во-первых, говорить о напряжении в образце – кубе или цилиндре – следует с оговоркой. Дело в том, что тензор напряжения при обычных прессовых испытаниях образцов не остается постоянным в плоскости их поперечного сечения. Поэтому под разрушающим напряжением понимается усредняющая величина $\sigma_c = f_c$, рассчитываемая как отношение приложенной прессом силы F к площади сечения A_c образца. Размерность прочности совпадает с размерностью напряжения и выражается обычно в МПа или Н/мм².

Во-вторых, бетон является структурно неоднородным материалом в очень широком диапазоне масштаба размеров. Макронеоднородность бетона – масштаб 10^0 – 10^1 мм – связана с присутствием в его составе крупного и мелкого заполнителей. К мезанеоднородностям –

масштаб 10^{-2} – 10^0 мм – можно отнести усадочные микротрещины в растворной части, поры, а также трещины между цементным камнем и крупным заполнителем. Таким образом, структура бетона насыщена дефектами, размеры которых простираются от субмолекулярных (дефекты кристаллов цементного камня и заполнителя) до сантиметровых; они и определяют в значительной мере поведение бетона под нагрузкой. Внешняя нагрузка создает в бетонном элементе сложное напряженное состояние. В бетонном элементе, подвергнутом сжатию, усилия концентрируются на зернах заполнителя, обладающих более высоким модулем упругости, чем растворная составляющая, что приводит к возникновению значительных напряжений в плоскости контакта крупного заполнителя и цементного камня, стремящихся нарушить связь между ними. Вокруг меза- и микродефектов также наблюдается концентрация сжимающих и растягивающих напряжений. В результате в бетонном образце, подвергнутом осевому сжатию, возникают как продольные сжимающие, так и поперечные растягивающие напряжения.

С увеличением нагрузки изменяется соотношение концентраций дефектов различного размерного масштаба: микродефекты, микротрещины развиваются и объединяются в макротрещины, пролегающие как по границам цементного камня и крупного заполнителя, так и через цементный камень и крупный заполнитель. После достижения дефектами критических размеров происходит разрушение бетона. Таким образом, предел кратковременной прочности бетона f_c отображает некоторую завершающую (или промежуточную) стадию процесса накопления дефектов в его структуре, но информации о развитии этого процесса данный параметр не содержит.

Процесс развития и накопления дефектов в структуре бетона проявляет себя изменением податливости образца по мере его нагружения. Выражается это в изменении пропорциональности между деформацией и напряжением. Поэтому более информативной прочностной характеристикой бетона, чем разрушающее напряжение f_c , может служить функция, связывающая относительную (или абсолютную) деформацию и напряжение в бетонном образце, графическое представление которой называют диаграммой « $\sigma - \varepsilon$ » (рис. 6.1, а). На диаграмме можно выделить два характерных участка – восходящую и нисходящую ветви. Восходящая ветвь описывает диаграмму сжатия при увеличении напряжения от нуля до точки, соответствующей

шей пределу кратковременной прочности бетона. Нисходящая ветвь соответствует процессу снижения напряжения при увеличении деформации, вплоть до дефрагментации (разрушения) испытательного образца. Этот участок можно описать величиной $\Delta\sigma_c/\Delta\varepsilon_c$, физический смысл и размерность которой такие же, как и у модуля упругости. Только в отличие от восходящей ветви, где $\Delta\sigma_c/\Delta\varepsilon_c > 0$, у нисходящей ветви $\Delta\sigma_c/\Delta\varepsilon_c < 0$.

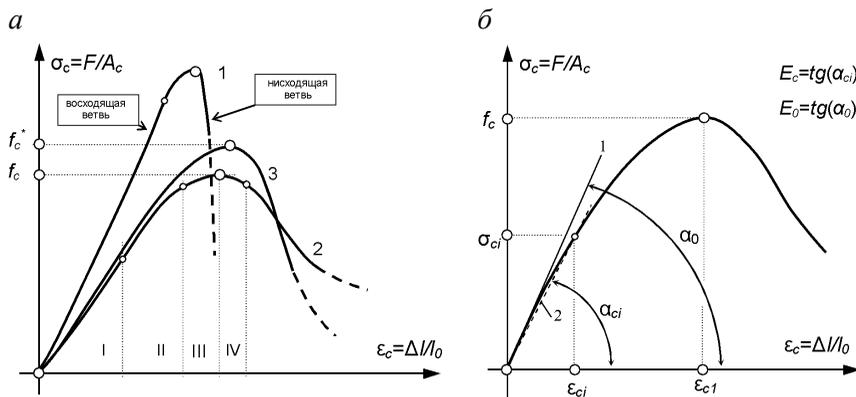


Рис. 6.1. Диаграммы одноосного сжатия бетонного образца:
 а – примеры диаграмм « σ – ε »;
 б – определение модуля упругости E_c

Характер диаграммы определяется проявлением целого ряда факторов, основными из которых являются: исходная структура бетона, зависящая от вида и соотношения его компонентов, цикличность и знакопеременность приложения нагрузки, а также технология изготовления.

Приведенная на рис. 6.1, а диаграмма 1 характерна для высокопрочных и ультравысокопрочных бетонов ($f_c \geq 100\text{--}150$ МПа), особенностью которых является склонность к хрупкому разрушению. Такой бетон имеет большое значение модуля упругости, сохраняющееся практически постоянным вплоть до момента разрушения. Процесс разрушения протекает с большой скоростью – лавинообразно, накопленная энергия упругого сжатия образца практически мгновенно расходуется на образование трещин и его фрагментацию.

У бетонов прочностью до 60 МПа (диаграммы 2 и 3, рис. 6.1, а) начальный участок I при $\sigma_c \leq (0,3-0,5)f_c$ остается практически линейным. На участке II начинает проявляться нелинейность диаграммы. На этой стадии нагружения часть энергии сжатия образца необратимо расходуется на образование и расширение микротрещин. Верхняя граница этой стадии нагружения находится на уровне напряжений $(0,7-0,75)f_c$. У высокопрочных бетонов эта стадия не является выраженной и заканчивается на уровне напряжений порядка $0,9f_c$. На III стадии формируются и увеличиваются микротрещины в растворной матрице и происходит перераспределение внутренних напряжений. При достижении верхней границы III стадии происходит интенсивное образование магистральных трещин, что приводит к разрушению бетона. Таким образом, даже для бетонов, имеющих одинаковое значение *предела кратковременной прочности*, процесс разрушения может протекать по-разному.

Нисходящая ветвь диаграммы у бетонов низкой и средней прочности имеет более пологий характер, в сравнении с высокопрочными бетонами, у которых она практически отсутствует.

Экспериментальное получение полной диаграммы нагружения бетонного образца, включающей нисходящую ветвь⁴⁰, связано с определенными техническими трудностями. Дело в том, что по мере нагнетания масла в гидроцилиндр пресса возрастает давление и, соответственно, сила нагружения испытуемого образца. Но одновременно увеличивается нагрузка на элементы конструкции пресса, которые, упруго деформируясь, накапливают потенциальную энергию⁴¹. Чем больше податливость этих элементов, тем больше энергии накопится. Накопление энергии происходит на восходящей ветви диаграммы. После достижения пикового значения напряжения дальнейшее перемещение плиты пресса может стать неуправляемым. Накопленная энергия упругой деформации силовых элементов пресса неконтролируемо будет израсходована на деформацию

⁴⁰ Полная диаграмма включает в себя и область растягивающих напряжений. Для бетона эту часть диаграммы обычно получают расчетным путем по данным испытаний на изгиб образцов-балок (призм).

⁴¹ Упругой податливостью обладают не столько плиты и стойки пресса, сколько элементы гидросистемы: трубопроводы, эластичные резиновые уплотнения, не удаленные пузырьки воздуха в гидросистеме.

и разрушение образца. Выразаться это будет в том, что плиты пресса будут «сами» продолжать сближаться, даже при выключенном гидронасосе, – участок IV на рис. 6.1, *a*. Этот процесс протекает в течение нескольких секунд, а при хрупком характере разрушения образца – за доли секунды. Если измерение давления в гидросистеме пресса производится механически манометром, а деформация образца – механическими индикаторами часового типа, то за столь короткое время визуально зарегистрировать характер связи между давлением (напряжением) и продольной деформацией образца не представляется возможным.

В современных компьютеризированных испытательных прессах большое внимание уделяется снижению упругой податливости элементов их конструкции, что достигается как конструктивными решениями, в частности увеличением жесткости рамы пресса, так и использованием автоматически регулируемой гидросистемы с применением быстродействующих датчиков давления и перемещения. Это позволяет компенсировать «остатки» податливости пресса, управляя давлением в его гидросистеме, и одновременно позволяет автоматически регистрировать обе ветви диаграммы одноосного сжатия бетонного образца при его «управляемой» деформации.

Существуют и другие технические приемы решения задачи регистрации нисходящей ветви диаграммы. Рассмотрим один из таких способов получения полной диаграммы для квазистатического режима нагружения с использованием обычного гидравлического пресса.

Управлять деформацией испытуемого образца на нисходящей ветви можно, создав дополнительное сопротивление плитам пресса, установив совместно с испытуемым образцом дополнительный упругий элемент (например, стальную кольцевую пружину 4 (рис. 6.2, *a*), обладающий большим диапазоном упругой деформации. В этом случае полная совместная (бетонный образец + пружина) диаграмма нагружения *a* (рис. 6.2, *б*) будет иметь только восходящую ветвь, которую несложно зарегистрировать на обычном испытательном прессе, задавая любую скорость перемещения плиты *l* пресса. Выделить из этой диаграммы (рис. 6.2, *б*) интересующую нас диаграмму $F - \epsilon$ для бетона можно расчетным путем, вычитая из ординат $F_{c,s}$ совместной диаграммы *a* ординаты F_s диаграммы упругого элемента *b*.

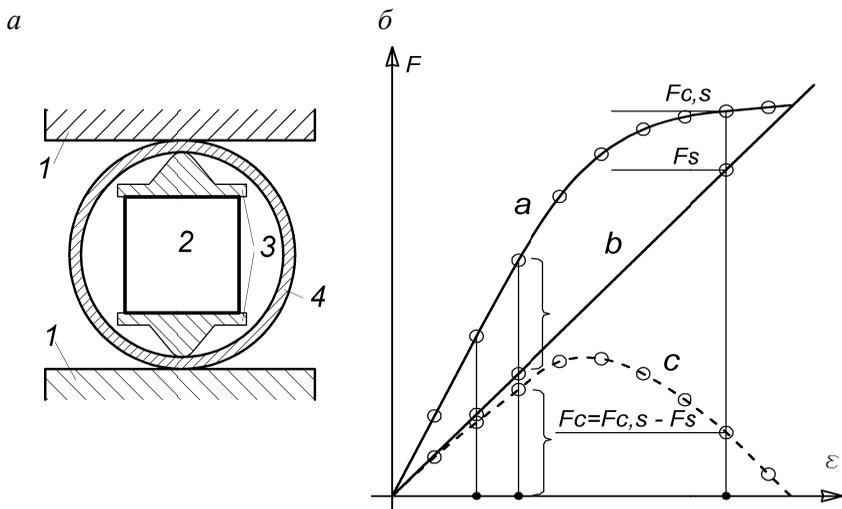


Рис. 6.2. Получение полной диаграммы одноосного сжатия бетонного образца:
a – схема испытаний; *б* – диаграммы нагружения:
a – диаграмма совместного нагружения образца и упругого кольца;
б – диаграмма нагружения упругого кольца; *с* – расчетная диаграмма
нагружения бетонного образца

Очевидно, что рассмотренная схема испытаний будет эффективной только в том случае, если крутизна $\Delta F_s / \Delta \varepsilon$ диаграммы нагружения дополнительного упругого элемента будет превышать по модулю крутизну $\Delta F_c / \Delta \varepsilon$ ниспадающей ветви испытуемого образца, в противном случае у совместной диаграммы может сохраниться ниспадающий участок, что чревато потерей управляемости деформацией. С другой стороны, если относительная погрешность δF_s определения ординаты диаграммы нагружения упругого элемента будет оставаться постоянной в рабочем диапазоне перемещения плиты пресса, то увеличение крутизны $\Delta F_s / \Delta \varepsilon$ диаграммы нагружения дополнительного упругого элемента будет приводить к росту абсолютной погрешности измерения ординаты F_c ниспадающей ветви расчетной диаграммы нагружения бетонного образца. В соответствии со схемой испытаний величина F_c рассчитывается по формуле

$$F_c = F_{c,s} - F_s. \quad (6.1)$$

Абсолютная погрешность ΔF_c имеет две составляющие: $\Delta F_{c,s}$ – погрешность измерения ординаты совместной диаграммы нагружения, и ΔF_s – погрешность измерения ординаты диаграммы нагружения упругого элемента. Погрешность измерения ординаты совместной диаграммы нагружения $\Delta F_{c,s}$ будет содержать неисключенную систематическую погрешность, обусловленную непостоянством распределения силы прессы $F_{c,s} = F_c + F_s$ между образцом и упругим элементом. Распределение сил будет зависеть от ряда факторов, в частности от вариации размеров испытательного образца. Кроме погрешности измерения силы F_c , будет присутствовать дополнительная погрешность измерения деформации образца $\varepsilon_{c,add}$, обусловленная вариабельностью механического контакта передаточных призм 3 (рис. 6.2, а) с плитами прессы. Указанные составляющие погрешности будут тем больше, чем большее усилие развивает пресс. Поэтому показатель упругости $\Delta F_s / \Delta \varepsilon$ дополнительного элемента 4 следует выбирать из условия его минимального превышения по модулю величины $\Delta F_c / \Delta \varepsilon$ нисходящей ветви испытываемого образца.

Разумеется, указанные погрешности можно минимизировать, если относительную деформацию ε определять непосредственно на испытываемом образце, что потребует дополнительного измерительного оборудования – тензорезисторов или иных прецизионных датчиков перемещения, а силы измерять отдельно – приложенную к образцу и приложенную к упругому элементу. Такое решение радикально повысит точность измерений, но потребует создания специализированного испытательного оборудования.

Процессы накопления дефектов, развития микротрещин, их преобразования в макротрещины и последующий распад бетона на отдельные фрагменты происходят не мгновенно, а имеют заметную временную протяженность, то есть носят кинетический характер⁴².

⁴² Рассматривая любой макропроцесс как последовательность большого числа микро- и нанопроцессов, можно предположить, что и процесс образования и развития дефектов в твердом теле, и бетоне в частности, является следствием длинной последовательности межмолекулярных взаимодействий – разрыва и образования связей между ними. Эта цепочка (или цепочки) молекул выполняют функцию счетчика времени, единицей измерения для которого служит время образования (разрыва) связи для пары или группы молекул.

Поэтому важным фактором, влияющим на результаты испытаний бетонных образцов на одноосное сжатие, является скорость приложения нагрузки: диаграммы деформирования образцов одного состава бетона, полученные для разных скоростей приложения нагрузки (диаграммы 2 и 3, рис. 6.1, а) могут заметно отличаться⁴³. Описание этой особенности поведения бетона возможно с привлечением так называемых реологических моделей.

Таким образом, стремление к более точному описанию физико-механических свойств бетона приводит к расширению перечня характеристических параметров, который, надо полагать, никогда не будет исчерпывающим. Какими бы параметрами мы ни ограничивались при описании прочностных свойств бетона, речь всегда может идти только о той или иной *модели* – идеализированном представлении его поведения в определенных условиях со всеми ограничениями и неточностями, присущими любой модели⁴⁴. Подбор характеристических параметров определяется конкретным назначением формируемой модели бетона. Если производится расчет по действующим нормативам несущей способности какой-либо типовой железобетонной конструкции, то прочностная модель бетона для конструктора обычно ограничивается показателем класса бетона по прочности и модулем упругости бетона. Если оценивать склонность бетона к хрупкому разрушению, например, при расчете каркаса здания на прогрессирующее обрушение, то модель бетона придется уточнить введением в нее дополнительных макропараметров – коэффициентов интенсивности напряжения, динамической вязкости, параметров ветвей диаграммы деформирования и др. Выбор характеристических параметров бетона выходит далеко за рамки метрологии в ее классическом понимании и является прерогативой специализированных дисциплин: бетоноведения, механики разрушения и др.

⁴³ Согласно ГОСТ 10180 [10] скорость увеличения нагрузки на испытуемый образец нормируется значением ~ 3 МПа/с.

⁴⁴ Это касается любого объекта и научного подхода к его рассмотрению. Известно высказывание Н. Винера (крупного математика и популяризатора кибернетики): «...полным описанием предмета является сам предмет».

6.1. Контроль прочности бетона железобетонных конструкций испытанием образцов

Прочностные показатели бетона, полученные по результатам испытаний образцов, характеризуют лишь бетон образцов, даже если они изготовлены из бетона того же состава, что и конструкция. Распространить эти показатели на бетон конструкции можно только с изрядной долей вероятности, поскольку условия укладки, уплотнения и выдерживания бетона крупноразмерной конструкции и малоразмерного испытательного образца заметно отличаются. Поэтому в строительном производстве всегда были востребованными методы испытаний бетона непосредственно в изготовленной бетонной или железобетонной конструкции. Самым простым и эффективным, на первый взгляд, можно считать метод, основанный на испытании образцов бетона, выпиленных или высверленных из массива контролируемой конструкции. Такой метод существует и регламентируется ГОСТ 28570 [14]⁴⁵. На рис. 6.3 показано типичное оборудование для отбора кернов из массива железобетонной конструкции, основным элементом которого является трубчатое сверло, на рабочей кромке которого имеется слой алмазного напыления.

Этот метод испытаний является базовым и наиболее точным, но используют его в практике строительства относительно редко. Дело в том, что в соответствии с ГОСТ 28570 размеры (диаметр и высота) высверленного испытательного образца-керна должны в несколько раз превышать размер зерна крупного заполнителя. Для тяжелого конструкционного бетона диаметр керна рекомендуется брать порядка 100 мм. А чтобы получить полноценный образец-цилиндр высотой 100 мм, глубину высверливания приходится брать больше – около 150 мм. Изъятие фрагмента бетона таких размеров из конструкций малого сечения – колонн, балок и других приведет к существенной потере их несущей способности. Кроме того, отбор керна в таких конструкциях зачастую представляет собой непростую задачу

⁴⁵ Постановлением Госстандарта РБ № 79 от 13.12.2012 с 01.09.2013 введен в действие СТБ EN 12504-1–2012 «Методы контроля бетона в конструкциях. Часть 1. Цилиндрические образцы. Отбор, проверка и проведение испытаний на сжатие».

из-за густого армирования: затруднительно найти участок необходимых размеров, свободный от арматуры.

а



б



Рис. 6.3. Оборудования для отбора кернов:
а – трубчатые сверла; *б* – станочный буркер

Другой проблемой при использовании этого метода испытаний является низкая репрезентативность (статистическая обеспеченность) выборки данных из-за невозможности отбора большого количества кернов из конструкции, что вынуждает в расчетах неопределенности результата испытаний использовать большие значения коэффициента доверия. Поэтому применение метода испытаний отобранных из бетонного массива образцов ограничивается, как правило, случаями, когда оценки прочности бетона конструкции другими методами имеют большие расхождения. Указанный метод незаменим для экспертных оценок прочности бетона, когда требуется высокая надежность оценки, а наносимые при испытаниях повреж-

дения не имеют значения, например, при обследовании разрушенных конструкций.

Частично указанные проблемы решаются использованием неразрушающих методов испытаний.

6.2. Неразрушающие механические методы испытаний прочности бетона

*Метод отрыва со скалыванием*⁴⁶ можно назвать методом локального разрушения, поскольку повреждения конструкции при испытаниях имеют место, но они значительно меньше, чем при отборе кернов. Оценка прочности бетона на сжатие производится по усилию вырывания анкера (рис. 6.4, 6.5, Д.1), установленного в высверленное в бетоне глухое отверстие – шпур. Показатель прочности бетона $f_{c,cube}$ находят по формуле

$$f_{c,cube} = m_1 m_2 P, \text{ МПа}, \quad (6.2)$$

где m_1 – коэффициент, учитывающий максимальный размер крупного заполнителя в зоне вырыва, принимается равным 1 при крупности менее 50 мм и 1,1 – при крупности 50 мм и более;

m_2 – коэффициент пропорциональности для перехода от усилия вырыва к прочности бетона;

P – сила вырыва анкерного устройства, кН.

Типичная конструкция анкера содержит разжимной конус 1 (рис. 6.4) и радиально расположенные вокруг конуса сегментные щеки 2, выполненные из закаленной стали.

Щеки удерживаются обоймой 3 и могут свободно перемещаться относительно друг друга в пределах нескольких миллиметров. Наружная поверхность щек рифленая. Диаметр высверливаемого шпура делается несколько большим, чем диаметр собранного анкера,

⁴⁶ Методы контроля бетона по классификации ГОСТ 18105–2010 [15] разделены на три группы: разрушающие, прямые неразрушающие, косвенные неразрушающие. К разрушающим относится метод контрольных образцов и образцов, отобранных из конструкции. Группа методов отрыва (отрыва, отрыва со скалыванием и скола ребра) относится к косвенным неразрушающим.

поэтому анкер в шпур устанавливается свободно. При вытягивании разжимного конуса щеки расходятся и, упираясь в стенки шпура рифленной поверхностью, входят в сцепление с бетоном. Возникшая сила трения между щеками анкера и бетоном такова, что при дальнейшем увеличении силы P анкер не может выйти из бетона. При достижении силой P значений порядка 10–50 кН (табл. 6.1) происходит отрыв анкера вместе с окружающим его фрагментом бетона, а на поверхности испытуемой конструкции остается коническая лунка (рис. 6.6, б). Сила отрыва создается либо гидравлическим, либо винтовым домкратом. Перечень приборов, реализующих данный метод, включает в себя: «ОНИКС-1.ОС» (НПП «Интерприбор» г. Челябинск) и приборы серии СКОЛ.

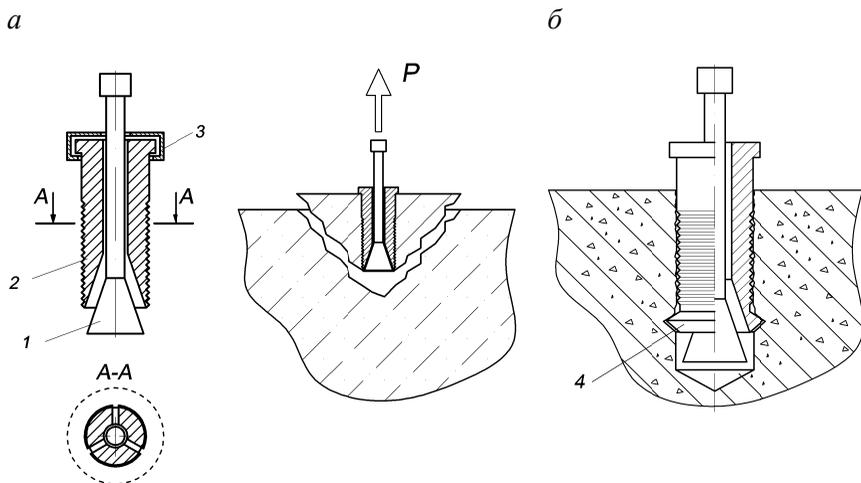


Рис. 6.4. Схема метода отрыва со скалыванием; конструкция анкера:
а – конструкция анкера и схема отрыва; *б* – схема анкера с кольцевым выступом;
 1 – рабочий стержень с разжимным конусом; 2 – сегментные рифленные щеки;
 3 – обойма; 4 – кольцевой выступ

Фактором, вносящим заметную неопределенность в оценку прочности бетона, является неустойчивое зацепление анкера с бетоном: сила трения распределяется неравномерно по длине шпура, из-за чего размеры конуса отрыва – его глубина и диаметр – могут заметно отличаться даже на соседних участках одной и той же конструкции.

В некоторых моделях приборов, в частности «ОНИКС-1.ОС», с целью стабилизации контакта анкера и бетона, в донной части шпура специальным приспособлением делают кольцевой паз, а щеки анкера имеют на концах выступы, заходящие в паз шпура (см. рис. 6.4, б). Такое решение стабилизирует положение поверхности отрыва и снижает разброс оценок прочности до уровня 10–15 %.

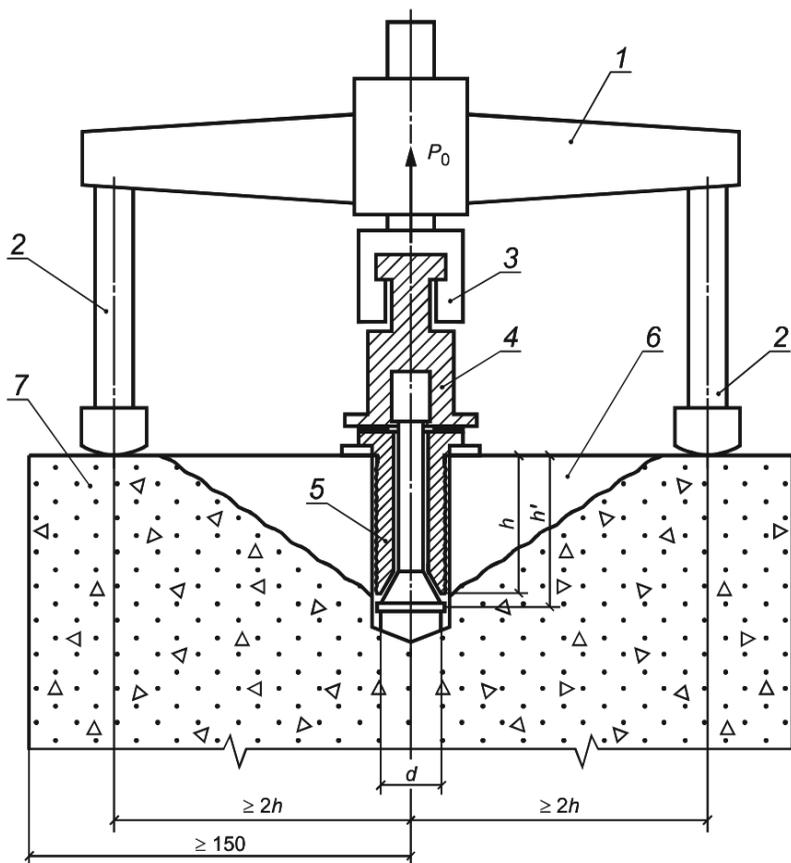


Рис. 6.5. Рабочая позиция установки измерителя прочности бетона ПОС-50МГ4У:
 1 – рама домкрата с силоизмерителем; 2 – опоры домкрата; 3 – захват;
 4 – переходник захвата; 5 – анкер; 6 – конус отрыва бетона

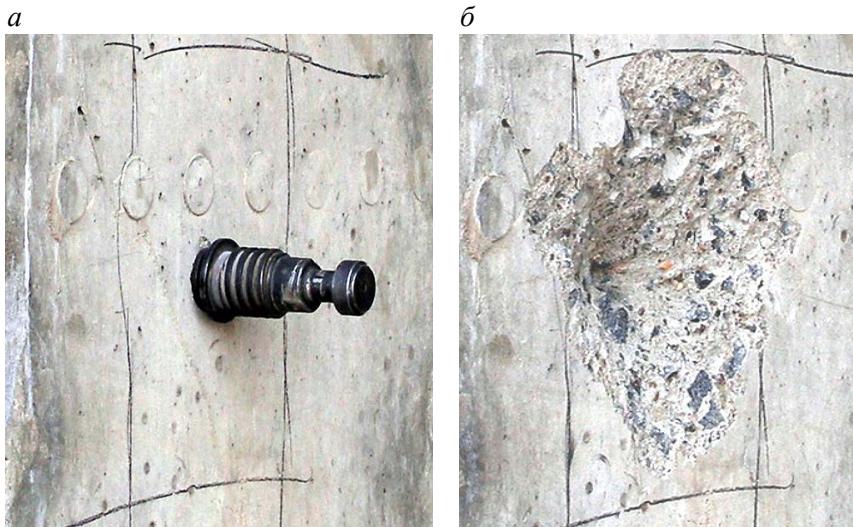


Рис. 6.6. Контроль прочности бетона монолитной колонны:

a – установленный в шпур анкер;

б – лунка на поверхности после отрыва анкера

Для метода скалывания ребра (рис. 6.7) прочность бетона определяется по формуле

$$f_{c,cube} = 0,058m(30P + P^2), \text{ МПа}, \quad (6.3)$$

где m – коэффициент, учитывающий максимальный размер крупного заполнителя, принимается равным 1 при крупности заполнителя менее 20 мм; 1,05 – при крупности заполнителя от 20 до 30 мм и 1,1 – при крупности от 30 до 40 мм;

P – сила скалывания, кН.

Скол ребра создается анкером в виде крюка специальной формы I (рис. 6.7), имеющим твердосплавный «зуб». Форма и размеры крюка подобраны так, что угол действия силы и объем бетона скола остаются постоянными. Это обстоятельство позволяет без каких-либо дополнительных измерений перейти по формуле (6.3) от величины силы скола к прочности бетона.

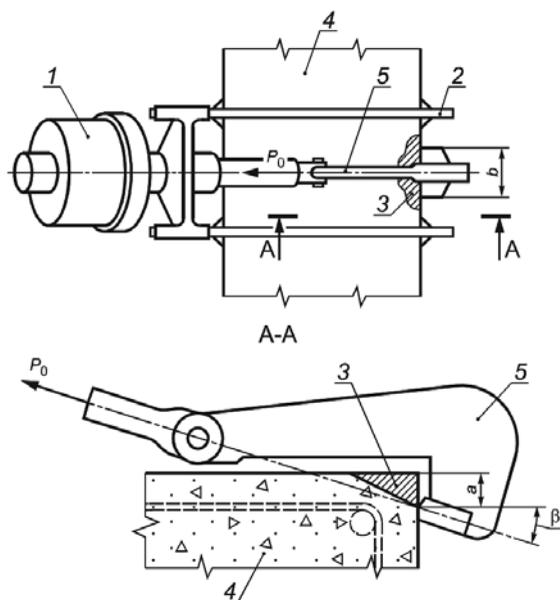


Рис. 6.7. Схема скалывания ребра:

1 – прибор; 2 – опорная рама; 3 – скалываемый бетон; 4 – испытуемая конструкция; 5 – скалывающий крюк с твердосплавным наконечником

Метод скола ребра удобен тем, что нет необходимости высверливать шпур. Но его использование ограничивается конструкциями, имеющими исключительно прямоугольное сечение. Максимальные габариты сечения контролируемой конструкции ограничиваются рабочей базой прибора и составляют порядка 500–600 мм, то есть скол ребра применяют обычно к железобетонным колоннам и балкам.

Для современных приборов метода отрыва (табл. 6.1) характерно наличие микроконтроллерного блока обработки и индикации результатов измерения. Регистрация силы отрыва осуществляется автоматически с помощью встроенных тензорезисторных датчиков. Полученное значение силы отрыва пересчитывается микроконтроллерным блоком по «защитым» в его память формулам (6.2) и (6.3) в показатель прочности. Приборы комплектуются сменными насадками, обеспечивающими испытание бетона как методом скалывания ребра, так и методом отрыва со скалыванием. С целью повышения точности и производительности испытаний в приборе, в зависимости

от метода испытаний, предусмотрена возможность ввода следующих корректирующих параметров, учитывающих вид бетона, условия его твердения, крупность заполнителя, типоразмер анкера. В табл. 6.1 приведены основные характеристики прибора.

Таблица 6.1

Характеристики приборов ПОС

Наименование характеристик	Скалывание ребра	Отрыв со скалыванием
Диапазон измерения прочности $f_{c,cube}$, МПа	10–70	5–100
Максимальное усилие скалывания (вырыва), кН	29,4 (ПОС-30МГ4«Скол») 49,0 (ПОС-50МГ4«Скол»)	
Основная относительная погрешность измерения силы, не более, %	± 2	
Размер анкера (тип II по ГОСТ 22690), мм	–	Ø16 × 35 (ПОС-30МГ4«Скол») Ø16 × 35, Ø24 × 48 (ПОС-50МГ4«Скол»)
Питание прибора	Батарея типа «Корунд» (6F22, 6LR61) 8 вольт	
Масса в полной комплектации, не более, кг	7,9 (ПОС-30МГ4«Скол») 9,8 (ПОС-50МГ4)	

Все приборы этого метода применяются в ответственных случаях при обследовании железобетонных конструкций и сооружений, а также для корректировки калибровочных коэффициентов ударно-импульсных и ультразвуковых приборов. Высокая трудоемкость метода и сопутствующие его применению повреждения испытываемых конструкций не позволяют использовать методы отрыва на строительной площадке в качестве основного средства технологического контроля бетона возводимых железобетонных конструкций.

Склерометрические методы испытания бетона предполагают незначительное повреждение его поверхностного слоя при вдавливании сферического или иной формы индентора (англ. *indent* – *вмятина*,

зазубрина) (рис. 6.8). Основными косвенными макропараметрами, по которым оценивают физико-механические свойства материала, являются сила вдавливания F и геометрические параметры отпечатка.

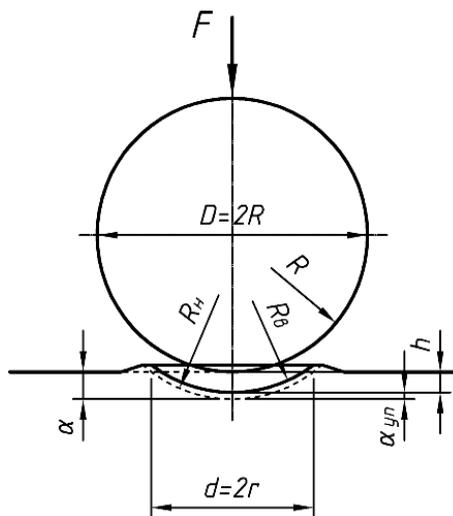


Рис. 6.8. Схема упругопластического контакта сферического индентора с поверхностью материала:

F – нагрузка вдавливания; D – диаметр шара в исходном положении; R – радиус сферического индентора в исходном положении; R_n – радиус кривизны невосстановленной поверхности отпечатка; R_b – радиус кривизны восстановленной поверхности отпечатка; α – полное упругопластическое сближение (внедрение); $\alpha_{уп}$ – упругое сближение (внедрение); h – пластическое сближение; d – диаметр отпечатка; r – радиус отпечатка

По аналогии с прочностью бетона f_c , равной отношению разрушающей силы F к площади сечения A_c образца, в качестве прочностной характеристики бетона для инденторных испытаний можем взять величину отношения силы вдавливания индентора F к площади отпечатка πr^2 . Величину

$$H = F / \pi r^2 \quad (6.4)$$

называют *твердостью* материала. Размерности твердости и прочности материала $[Н \cdot м^{-2}]$ (бетона в том числе) совпадают. Разумеется,

напряженно-деформированное состояние бетона в зоне индентирования и в массиве испытательного бетонного образца при прессовых испытаниях не совпадает. Но совпадение размерностей прочности и твердости дает основание предполагать существование их взаимной корреляции.

Размерность твердости H (и прочности f_c) [$\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$] можно записать в следующем виде, умножив и разделив ее на размерность длины:

$$[\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}] = [\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}] \cdot [\text{м}\cdot\text{м}^{-1}] = [\text{Н}\cdot\text{м}] \cdot [\text{м}^{-3}] = [\text{Дж}\cdot\text{м}^{-3}]. \quad (6.5)$$

Из выражения (6.5) следует, что твердость должна с точностью до постоянного коэффициента совпадать с затратами энергии на единицу объема восстановленного отпечатка, то есть твердость и прочность материала являются энергетическими величинами.

Если для характеристики процесса индентирования другой альтернативы, как рассматривать соотношение силы внедрения и геометрических параметров отпечатка, не просматривается, то технических способов измерения указанных параметров существует множество. К традиционным, получившим в недавнем прошлом методов оценки параметров индентирования, относятся методы пластической деформации и упругого отскока.

Методы пластической деформации

Основа этой группы методов – зависимость диаметра отпечатка, возникающего на поверхности испытуемого изделия при воздействии штампа, обычно сферической формы, от твердости материала. Использование метода регламентируется стандартом СТБ 2264–2012 [34]. ГОСТ 22690–88 [11], действующий на территории Российской Федерации, содержит некоторую дополнительную информацию о методе, в частности о реализующих его приборах.

Наиболее распространенными являются приборы ударного действия: молоток Кашкарова К. П., молоток ХПС, шариковый прибор ПБ, дисковые приборы ДПГ-4(5) Губбера. Наиболее популярным из них, благодаря простоте конструкции, является эталонный молоток Кашкарова [20]. Прочность бетона оценивается по градуировочной зависимости $f_c - d_0/d_s$, где d_0 и d_s – диаметры отпечатков шарика-индентора на поверхности бетона и эталонном стальном стержне (рис. 6.9).

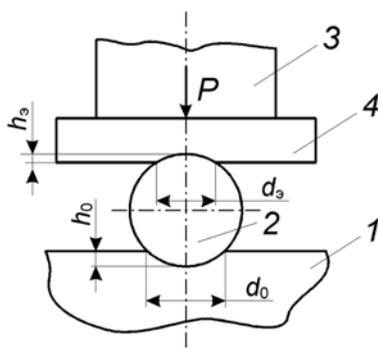


Рис. 6.9. Схема метода пластической деформации:
 1 – испытуемый бетон; 2 – индентор; 3 – ударник; 4 – эталонный образец

По существу, молоток Кашкарова позволяет сопоставить твердость эталонного стального стержня с твердостью контролируемого бетона. Метод применяют для оценки прочности тяжелых бетонов с f_c в пределах 5–35 МПа. Он характерен невысокой оперативностью, связанной с необходимостью визуально оценивать размеры отпечатков, диаметр которых лежит в пределах 1–8 мм. Оценки прочности сильно подвержены влиянию состояния поверхностного слоя изделия. Основным недостатком группы методов пластической деформации является то, что измерению подвергается лишь твердость растворной части бетона и не учитывается влияние вида, гранулометрического состава крупного заполнителя, его сцепления с растворной составляющей бетона.

Оценки прочности бетона методами пластической деформации, как и всеми другими склерометрическими методами, подвержены влиянию технологических факторов бетона: вариации соотношения компонентов бетонной смеси, срока набора прочности, условий выдерживания бетона. Эти факторы проявляют себя изменением соотношения упругих и пластичных параметров бетона, которые в разной мере влияют на его твердость.

Все без исключения склерометрические методы чувствительны к изменению фазового состояния капиллярной воды. Учет замораживания бетона возможен введением поправочных коэффициентов, но этот способ приводит к снижению точности оценки прочности, так как повышение поверхностной твердости бетона при заморажи-

вании зависит не только от температуры, но и от степени водонасыщения и структуры бетона. Тем не менее, при соблюдении определенных условий, оговоренных в [11, 34], допускается оценивать прочность бетона механическими методами без введения поправок.

Влияние водонасыщения бетона на твердость его поверхности является установленным фактом. Известен так называемый эффект Ребиндера – увеличение размеров отпечатков при увлажнении поверхности бетона [1]. Указанный эффект может быть использован для повышения точности контроля. Длительное увлажнение поверхности бетона, предусматриваемое по методу Ф. М. Губбера, приводит к увеличению размеров отпечатков, что позволяет несколько снизить погрешность их измерения. Но сопутствующее усложнение процедуры контроля, связанное с необходимостью корректировать градуировочную зависимость метода, не привело к практическому использованию данной методики.

Стремление к упрощению процедуры контроля является причиной постепенного вытеснения приборов этого метода приборами методов упругого отскока и ударного импульса. Вытеснение из обращения метода пластической деформации является следствием не «врожденного» недостатка самого принципа получения информации о прочности бетона, а отсутствием автоматизации процесса измерения в существующих моделях приборов. Реализация метода на новой технической основе может его вернуть в строй самых распространенных методов испытаний.

Метод упругого отскока реализуется приборами-склерометрами, или, как их еще называют, молотками Шмидта (*Shmidt Hammer*). Метод и первая конструкция прибора контроля прочности бетона были разработаны Е. Шмидтом в 1948 г. [41]. Система неразрушающего контроля бетонных конструкций с использованием молотков Шмидта была внедрена фирмой «Proceq» в середине 50-х годов. Испытания с использованием молотков Шмидта включены в стандарты и нормативные документы многих стран: международный – ISO/DIS 8045, Евросоюза – EN 12504-2 и ENV 206, Великобритании – BS 1881, часть 202, Германии – DIN 1048, Российской Федерации – ГОСТ 22690, США – ASTM C805 и ASTM D5873 (горные породы), Франции – NFP 18-417, Китая – JGJ/T 23–2001 и JJG 817–1993.

В Республике Беларусь испытания молотком Шмидта регламентируются СТБ 2264–2012 и ГОСТ 22690–88.

Метод упругого отскока основывается на связи предела прочности бетона и потерь кинетической энергии индентора, затраченной на пластическое деформирование зоны взаимодействия. На рис. 6.10 показаны стадии взаимодействия твердосплавного индентора 3 с контролируемой поверхностью. Пружина 1 разгоняет боек 2, который передает через индентор свою кинетическую энергию на создание деформации в контролируемой зоне поверхности массива. В зависимости от кинетической энергии и массы элементов ударного механизма склерометра взаимодействие индентора с поверхностью бетона может быть упругим и упругопластическим. Взаимодействие в начальной стадии контакта является упругим. Если напряжения в контактной зоне превышают предел прочности материала, то возникает пластическая деформация, которая по мере вдавливания индентора распространяется на все пятно контакта.

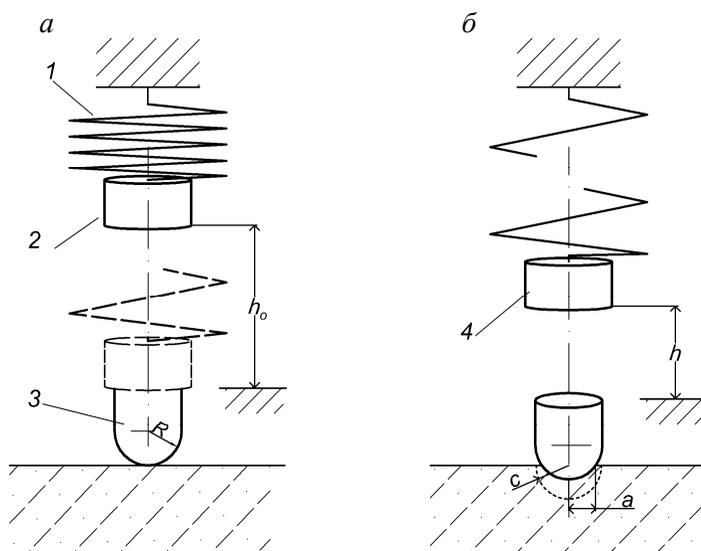


Рис. 6.10. Схема и основные элементы ударного склерометра:
 а – исходное состояние и начало ударного взаимодействия с поверхностью контролируемого изделия; б – момент регистрации отскока бойка;
 1 – рабочая пружина; 2 – боек в исходном положении;
 3 – индентор; 4 – положение бойка после отскока

В этом случае сила вдавливания будет прямо пропорциональна площади контакта. После остановки индентора начнется стадия упругого восстановления деформированной зоны. За счет действия упругих сил индентор приобретет скорость отскока, снижение энергии которого будет определяться потерями на создание пластической деформации. Основываясь на результатах для случая упругопластического ударного взаимодействия индентора с бетоном можно записать:

$$\frac{W'}{W_0} = \frac{V'^2}{V_0^2} = \frac{\pi^{5/4} 4^{3/4} \cdot 3^{9/4} \sigma_d^{5/4} R^{3/4}}{10W_0^{1/4} E^*}, \quad (6.6)$$

где W_0 – кинетическая энергия индентора в момент удара;

W' – кинетическая энергия индентора непосредственно после удара;

V_0, V' – скорости бойка перед и после удара соответственно;

σ_d – динамический предел упругости бетона.

Из формулы (6.6) следует, что косвенный параметр – высота отскока бойка, или, как его именуют в англоязычной литературе, индекс отскока (*rebound index*), определяется показателем прочности бетона – его пределом упругости – и упругими параметрами системы «индентор–бетон», причем характер влияния упругости и прочности на энергию отскока бойка противоположный: большему значению модуля упругости и большей прочности бетона может соответствовать неизменная высота отскока бойка прибора.

Перечень приборов, реализующих различные вариации метода упругого отскока, достаточно широк и продолжает пополняться. Первое место по распространенности в строительных организациях Республики Беларусь, судя по имеющимся данным, принадлежит хорошо зарекомендовавшим себя приборам: ОМШ-1, Original Schmidt, Schmidt OS-120, С181, ИП-38, «Schmidt-Hammer».

По западной классификации, в зависимости от энергии удара индентора, молотки Шмидта делятся на следующие типы:

M – 29,5 Дж, для испытания бетона фундаментов, мостов, покрытия дорог и других массивных конструкций;

N – 2,207 Дж, для испытания тяжелых бетонов монолитных и конструкций заводского изготовления;

$P - 0,9$ Дж, молоток маятникового типа для испытания бетонов и материалов малой твердости и прочности, например газобетон с прочностью от 5 до 20 МПа;

$L - 0,735$ Дж, для испытания легких бетонов и растворов.

Наиболее распространенными в гражданском строительстве являются молотки типа *N*. На рис. 6.11 показаны типичные образцы приборов этого метода испытаний.

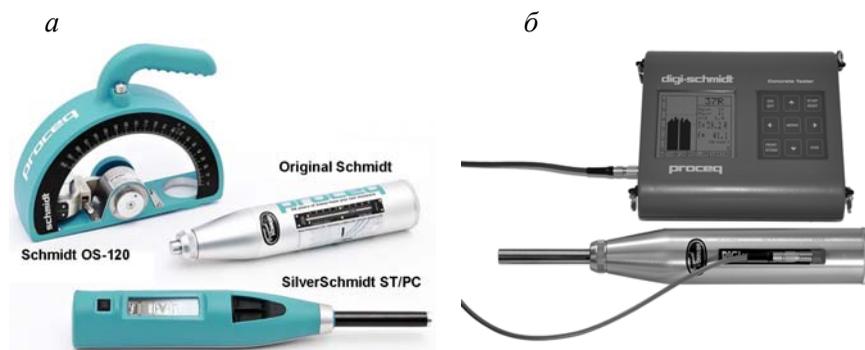


Рис. 6.11. Образцы приборов упругого отскока
a – прибор испытания бетона Digi-Schmidt 2000; *б* – прибор фирмы Proceq

Конструкции молотков Шмидта разных изготовителей в большинстве случаев содержат одинаковые узлы, имеющие принципиальные отличия (рис. 6.12). Существуют модификации приборов со встроенной механической регистрацией индекса отскока на бумажной ленте. Имеются образцы так называемых «электронных» склерометров, в частности Digi Schmidt и Proceq, с улучшенными пользовательскими функциями – с электронной регистрацией и обработкой данных (рис. 6.11, *б*). Наличие электронного блока обработки информации позволяет заметно повысить оперативность контроля при расширении функций; в частности предусматривается предварительный ввод в используемый алгоритм обработки данных измерения поправок, учитывающих вид бетона, рабочую ориентацию склерометра, глубину карбонизации.

Одним из принципиальных недостатков склерометрических методов контроля бетона является сильная подверженность их оценок влиянию состояния его поверхностного слоя бетона толщиной 3–5 мм.

Именно этот слой бетона в максимальной степени подвержен влиянию технологических, а также погодных факторов, особенно в начальный период набора прочности.

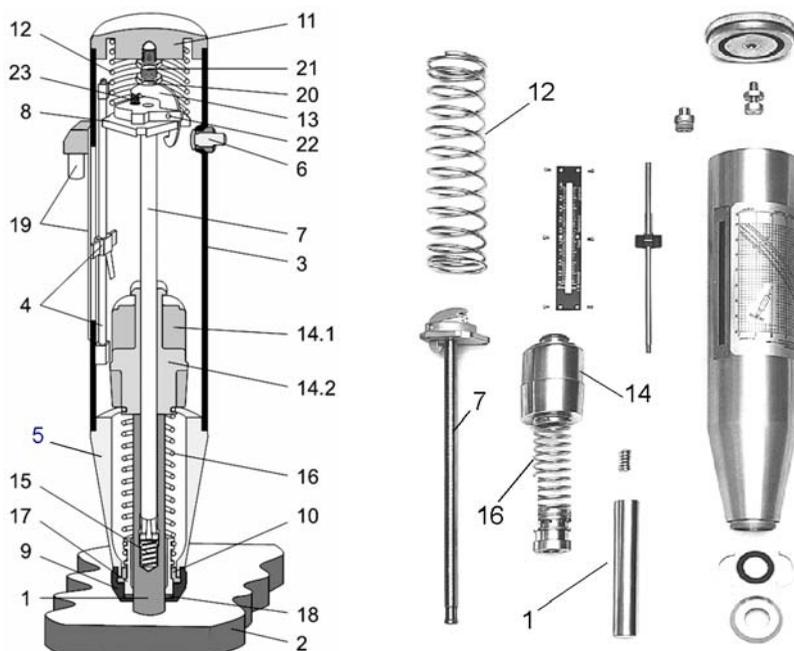


Рис. 6.12. Конструкция типичного молотка Шмидта:

- 1 – индентор; 2 – контролируемая поверхность; 3, 5, 9 – элементы корпуса;
- 4 – указатель-ползунок с направляющей; 6 – кнопка фиксатора;
- 7 – направляющая бойка; 8, 13, 21, 22, 23 – элементы спускового механизма;
- 10 – кольцо из двух сегментов; 11 – крышка; 12 – возвратная пружина;
- 14 – боек; 14.1 – модель ND; 14.2 – модель LD; 15 – амортизирующая пружина;
- 16 – ударная пружина; 17 – направляющая втулка; 18 – войлочная шайба;
- 19 – резисторный датчик с разъемом; 20, 21 – регулировочные винты

По данным [16] линейный размер области упругопластической среды (рис. 6.10, б), в которой напряжения достигают предела прочности (пластическая зона), выражается для сферического индентора соотношением $c/a \approx 2,2-2,3$, где c и a соответственно – радиус пластической зоны материала и радиус отпечатка индентора. Для молотка Шмидта типа N , диаметр $2a$ отпечатка составляет 3–9 мм, для прибо-

ра ИПС-МГ4 – 2–5 мм. Соответственно, радиус упругопластической зоны для молотка Шмидта – 4–10 мм, для ИПС-МГ4 – 2,5–5 мм.

На рис. 6.13 приведены данные контроля прочности бетона монолитной бетонной плиты перекрытия несколькими приборами: ОМШ-1 – упругий отскок, ПОС-30 «Скол» – метод отрыва со скалыванием и бетон-тестер – ультразвуковой импульсный метод. Возраст бетона плиты 30–35 суток. Можно видеть, что оценки прочности бетона методом упругого отскока и методом отрыва со скалыванием различаются в 2,5–3,5 раза при контроле неподготовленной поверхности; на 15–28 % – при контроле поверхности бетона, ошлифованной абразивом на 3–5 мм. Получить на этом изделии устойчивые результаты методом ударного импульса (прибор ИПС-МГ) не удалось вовсе.

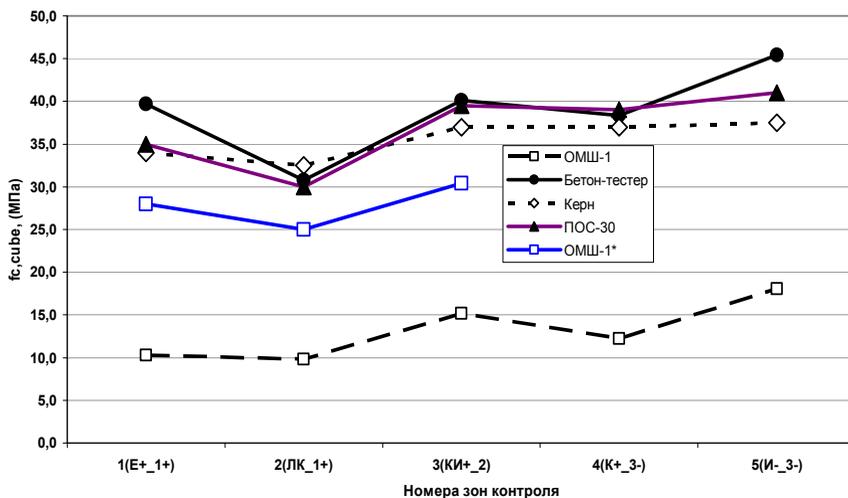


Рис. 6.13. Распределение оценок прочности бетона плиты перекрытия по ее поверхности:

ОМШ-1 – оценки прочности бетона склерометром без подготовки поверхности;
 ОМШ-1* – оценки на выровненной поверхности (снят слой бетона 3–5 мм);
 Керн – оценки прочности по результатам испытаний выбуренных кернов (по ГОСТ 28570-90);
 ПОС-30 – оценки прочности бетона методом отрыва со скалыванием;
 Бетон-тестер – оценки прочности ультразвуковым прибором УК1401 (база измерения – 150 мм)

В отличие от оценок прочности бетона плиты механическими методами, оценки ультразвуковым импульсным методом практически не были подвержены влиянию качества поверхностного слоя.

Противоположный эффект оказывает карбонизация поверхностного слоя бетона. С увеличением возраста бетона и глубины проникновения в него соединений углерода индекс отскока значительно возрастает. Учет глубины карбонизации бетона предложен в китайском стандарте JGJ/T 23–2001. Там приводятся значения поправочного коэффициента к индексу отскока в зависимости от глубины карбонизации в диапазоне ее значений от 0 до 6 мм. При большей глубине карбонизации поправочный коэффициент не меняется и остается на уровне около 40 %.

На рис. 6.14 приведены диаграммы для определения поправочного коэффициента снижения индекса отскока, который компания Proseq рекомендует для своих приборов.

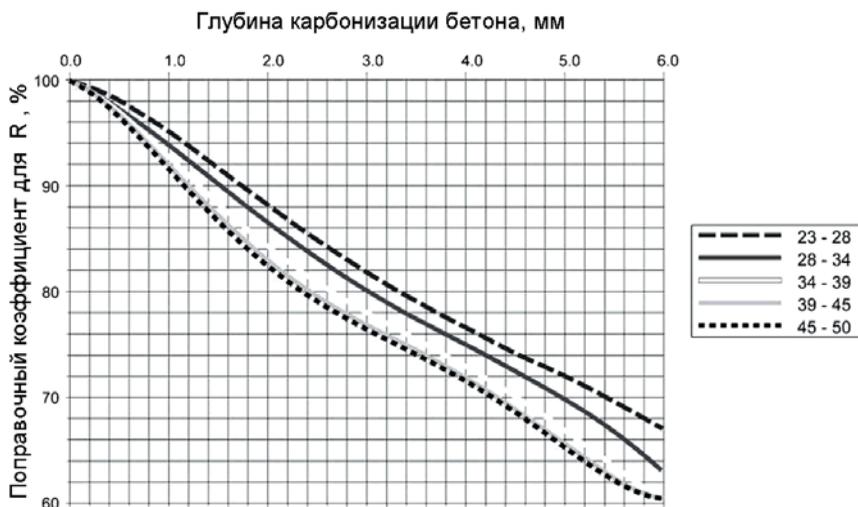


Рис. 6.14. Зависимость поправочного коэффициента для индекса отскока от глубины карбонизации бетона

Указанная в стандарте JGJ/T 23-2001 предельная толщина карбонизации – 6 мм – косвенно характеризует «проникающую способность» метода упругого отскока. Заметим, что предельная толщина карбонизации – показатель, зависящий от энергии удара, а значит, зависит от типа молотка.

Несомненным достоинством приборов метода упругого отскока является простота конструкции и достаточно высокая оператив-

ность получения результатов. В то же время следует иметь в виду, что метод упругого отскока не является безэталонным, для каждого типа приборов этого метода требуется своя градуировочная зависимость. В качестве градуировочной зависимости ГОСТ 22690, СТБ 2264, СТБ EN 12504–1–2012 рекомендуют использование линейной функциональной зависимости вида $f_{c,I} = a + bI$, где I – индекс (высота) отскока.

При построении градуировочных зависимостей и использовании молотков Шмидта в построчных условиях необходимо учитывать систематическую ошибку измерения, возникающую вследствие смены направления рабочей ориентации прибора⁴⁷.

Для приборов типа молотка Шмидта (Original Shmidt, ОМШ-1, С181 и др.) коррекцию выполняют введением поправки ΔI к значению косвенного параметра – индексу отскока индентора:

$$f_{c,Sh}^* = f_{c,Sh}(I + \Delta I), \quad (6.7)$$

где $f_{c,Sh}^*$ – скорректированное значение прочности бетона, определенной по градуировочной зависимости.

Не приводя расчетов поправок, заметим, что типичное значение поправки ΔI составляет около 2 единиц, что для большинства моделей молотков Шмидта соответствует 2–3 МПа для оценки прочности тяжелого бетона.

6.3. Метод ударного импульса

Процесс ударного взаимодействия твердого индентора с бетоном может быть описан с учетом времени его протекания. Это обеспечивает определенный эффект: временные параметры взаимодействия выгодны с позиций современной аппаратной реализации метода, так как временные интервалы могут быть измерены с точностью значительно большей, чем высота отскока бойка или глубина внед-

⁴⁷ Рассмотренный ниже метод динамического индентирования свободен от этого недостатка: изменение энергии удара может быть учтено автоматически. Поскольку в приборе происходит непрерывное измерение скорости индентора, то, зная скорость индентора в момент касания контролируемой поверхности, всегда можно рассчитать его кинетическую энергию.

рения индентора. На практике это направление развития механических методов получило в разработке ударно-импульсного метода [18]. Физическая основа метода позволяет проводить параллель с методами упругого отскока и пластической деформации.

Конструктивно индентор таких приборов представляет собой акселерометр (рис. 6.15, *a*), генерирующий электрический сигнал, содержащий информацию о динамике силового взаимодействия индентора с контролируемой поверхностью. Обычно в качестве чувствительного преобразующего элемента используется вставка из пьезокерамики.

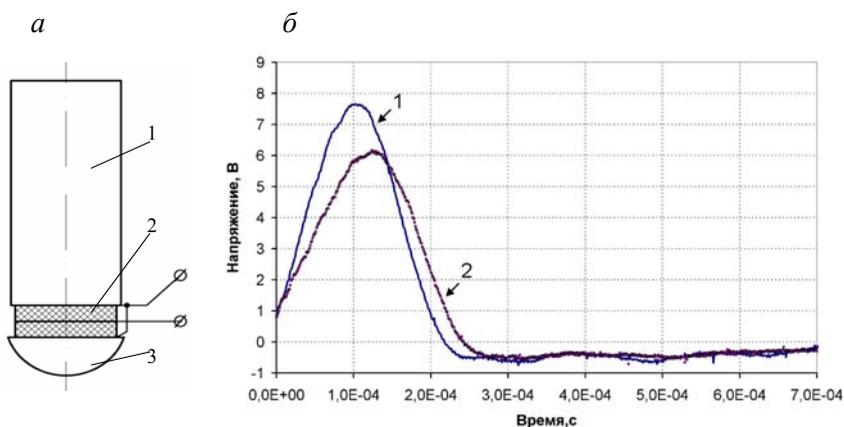


Рис. 6.15. Индентор-акселерометр прибора метода ударного импульса: *a* – конструкция индентора (1 – боек; 2 – пьезоэлемент; 3 – твердосплавный сферический наконечник); *б* – временные диаграммы первого импульса индентирования образцов-кубов бетона (1 – $f_c = 46$ МПа; 2 – $f_c = 35,5$ МПа)

Амплитуда сигнала акселерометра соответствует максимальной силе взаимодействия, а длительность сигнала – времени взаимодействия. Большому значению прочности и твердости испытуемого материала соответствуют меньшая длительность сигнала и бóльшая амплитуда (см. рис. 6.15, *б*). Информационными (косвенными) параметрами прочности бетона могут являться как длительность, так и амплитуда первого импульса (см. рис. 6.15, *б*). Определение прочности бетона осуществляется на основе установленной разработчиками зависимости, близкой к линейной:

$$f_c = kdF/dt, \quad (6.8)$$

где F – сила соударения твердосплавного индентора с поверхностью бетона;

t – время взаимодействия.

Поскольку упругость пружинного механизма прибора можно считать постоянной, то уменьшение высоты отскока бойка будет приводить к уменьшению временного промежутка между повторяющимися ударами. На рис. 6.16 приведена временная диаграмма сигнала датчика прибора ИПС-МГ4 для большого масштаба времени, представляющая собой последовательность затухающих по амплитуде импульсов.

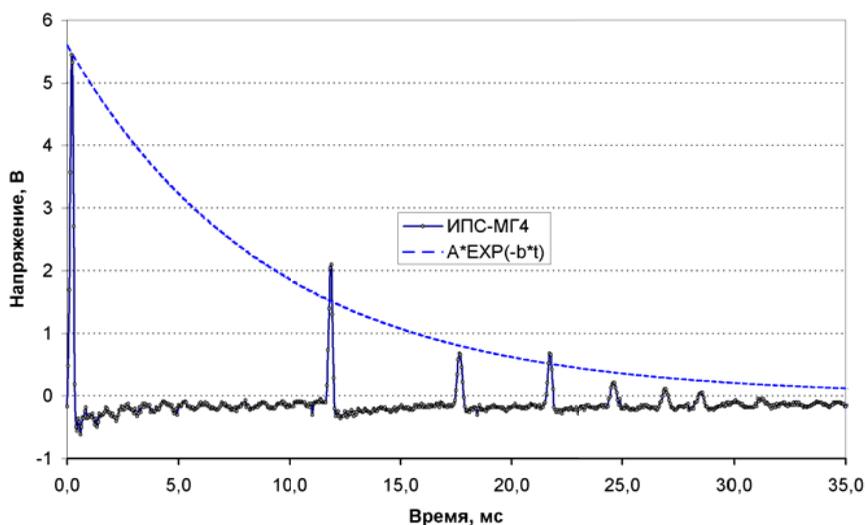


Рис. 6.16. Временные диаграммы всей последовательности импульсов датчика прибора ИПС-МГ4

Так как, начиная со второго импульса, индентирование происходит с меньшей энергией в уже образовавшийся отпечаток, то компонента пластической деформации с каждым ударом уменьшается, а взаимодействие индентора с бетоном становится упругим. Информацию об упругих свойствах бетона содержит показатель b

(см. рис. 6.16), характеризующий затухание всей импульсной последовательности⁴⁸.

Метод ударного импульса, так же как и метод упругого отскока, невозможно рассматривать в отрыве от конструкции прибора, его реализующего, и заложенного алгоритма обработки сигнала. Это создает серьезные трудности при попытке сравнить эффективность приборов разных конструкций и фирм-производителей.

В перечень современных приборов, реализующих метод ударного импульса, входят приборы серии ОНИКС (НПП «Карат») и приборы серии ИПС-МГ4: ИПС-МГ4 – 01/03 (СКТБ «Стройприбор»). Эти приборы предназначены для оперативного определения прочности бетона на сжатие неразрушающим ударно-импульсным методом в соответствии с ГОСТ-22690 и ГОСТ-18105 при технологическом контроле качества изделий, обследовании зданий, сооружений и конструкций; диапазон измерения прочности бетона – 2–100 МПа, энергия удара – 0,07–0,12 Дж. Следует заметить, что в странах Евросоюза и США в перечне стандартизированных этого метода нет.

Метод ударного импульса, как и все иные склерометрические методы испытаний бетона, не является безэталонным, он требует использования индивидуальных градуировочных зависимостей и учета технологических факторов бетона. В частности, применение метода ударного импульса для контроля кинетики твердения бетонных образцов в раннем возрасте дает, как правило, заметное (от 10 % до 40 %) занижение прочности твердеющего бетона при использовании базовой градуировочной зависимости, заложенной в измерительный алгоритм прибора. Поскольку пользователь прибора не имеет возможности корректировать значение косвенного параметра⁴⁹, то по-

⁴⁸ После удара и отскока от поверхности бетона, индентор под действием рабочей пружины совершает повторный удар, но уже с меньшей энергией. Количество таких ударов и значения их параметров могут служить косвенными параметрами метода наряду с амплитудой импульсов и их длительностью.

⁴⁹ Заметим, что изготовители приборов этого метода не указывают ни косвенных параметров, ни алгоритма их обработки, ограничиваясь упоминаниями об одно- или двухпараметровом контроле. Это обстоятельство затрудняет использование прибора ударного импульса в исследовательских целях, а пользователям – самостоятельное формирование алгоритмов обработки косвенных параметров.

правка вводится в окончательный результат измерения прочности бетона в форме поправочной (градуировочной) функции F_{Π}

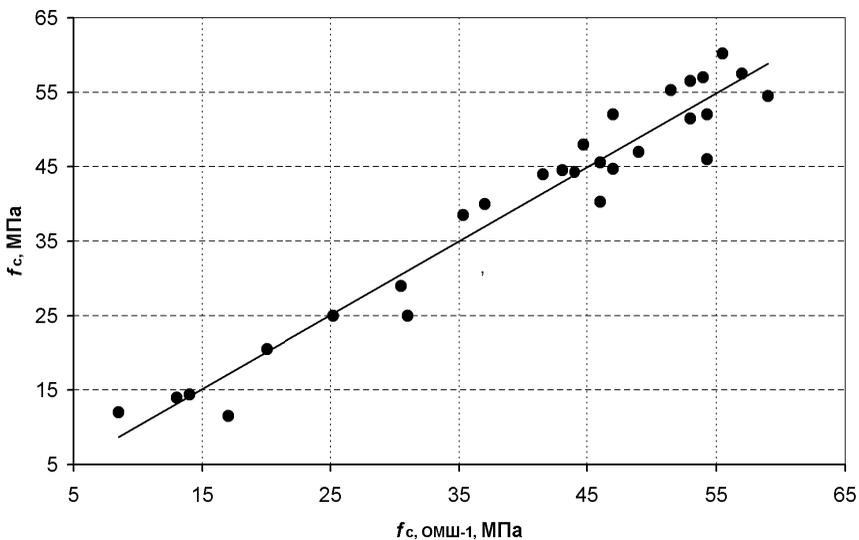
$$f_{c,H}^* = F_{\Pi}(f_{c,H}^{basic}),$$

где $f_{c,H}^*$ – скорректированная оценка прочности методом ударного импульса;

$f_{c,H}^{basic}$ – оценка прочности по базовой зависимости для данного прибора;

F_{Π} – поправочная функция.

На рис. 6.17 и рис. 6.18 приведены примеры использования индивидуальных поправочных функций (градуировок) для приборов метода упругого отскока (ОМШ-1) и метода ударного импульса (прибор ИПС-МГ4).



○ – оценки прочности по градуировке $f_{c,1} = -23,49 + 2,03 \cdot I$

Рис. 6.17. Соответствие оценок прочности бетонных образцов методом упругого отскока и пресовых испытаний

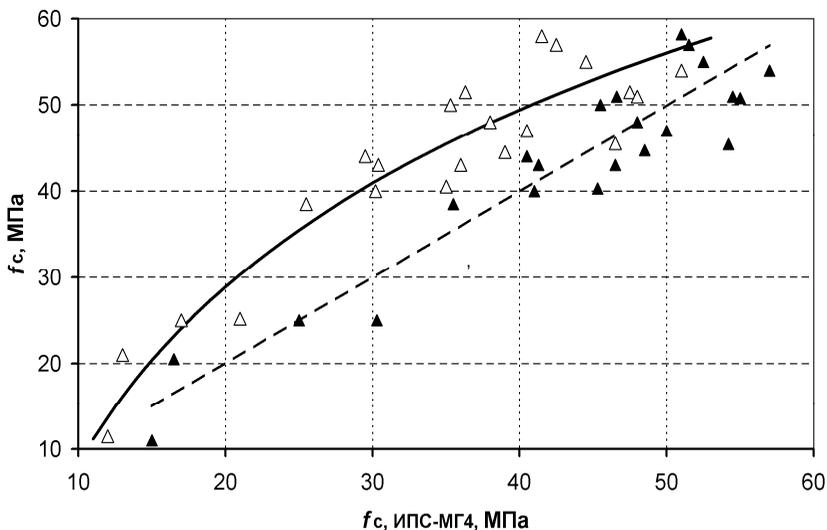


Рис. 6.18. Соответствие оценок прочности бетонных образцов методом ударного импульса и прессовых испытаний:

Δ – оценки прочности по базовой градуировке;

▲ – оценки прочности с применением поправки: $f_{c,H}^* = 29,63 \cdot \ln(f_{c,H}^{bas}) - 59,88$

Как недостаток приборов измерения прочности бетона ударным методом можно отметить их низкую чувствительность к структурным нарушениям – макротрещинам, пустотам. На результат измерения большое влияние оказывают зерна крупного заполнителя, присутствующие в зоне индентирования. Невысокая «проникающая» способность этого метода испытаний является следствием малой энергии удара и малой «вовлеченной» массы бетона, ограниченной поверхностным слоем бетона толщиной 3–5 мм.

С другой стороны, небольшая масса индентора и малая энергия удара позволяют успешно контролировать изделия, для которых именно поверхностная твердость является нормируемым параметром. Приборы данного типа, обладая низкой, в сравнении с молотком Шмидта, энергией удара и массой индентора, более чувствительны к прочностным параметрам наружного слоя бетона и наличию неровностей. На рис. 6.19 приведены данные испытания бетонных полов, выполненных с упрочнением верхнего слоя механическим втиранием упрочняющего компонента.

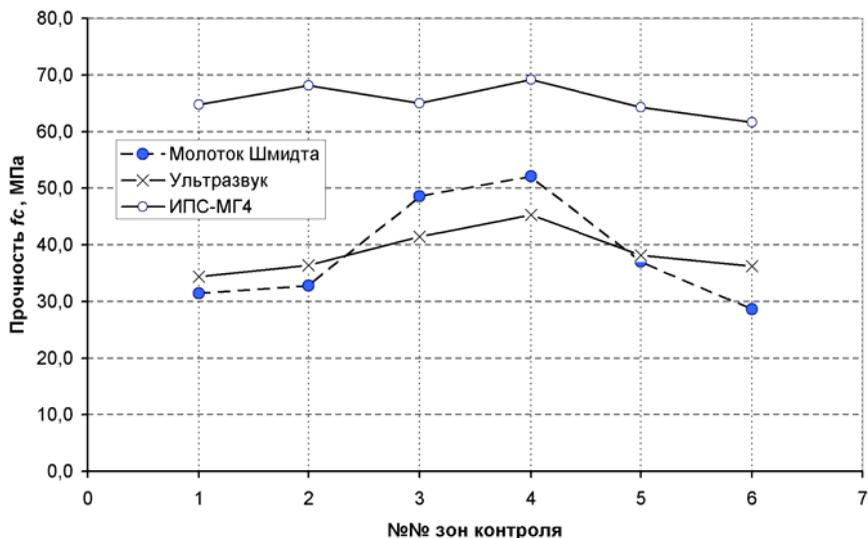


Рис. 6.19. Распределение оценок прочности бетонной плиты с упрочненным верхним слоем неразрушающими методами испытаний

Бетонное основание пола (толщина $\sim 5\text{--}7$ см) выполнено из сталефибробетона проектного класса по прочности С25/30. Упрочнению подвергался верхний слой бетона толщиной 3–5 мм. По данным ультразвуковых испытаний прочность бетонного массива соответствует значениям 34–45 МПа. Оценки прочности бетона механическими методами испытаний различаются более чем в два раза, причем показания склерометра ОМШ-1, имеющего большую энергию удара, ближе к данным ультразвукового метода, но имеют значительный разброс – от 29 до 52 МПа, что, вероятно, связано с различием толщине упрочненного слоя выбранных зон контроля бетонного. Влияние упрочняющего слоя на результаты испытаний методом упругого отскока аналогично влиянию карбонизации (см. рис. 6.14). Оценки ударно-импульсного метода (ИПС-МГ4) имеют хорошую повторяемость и соответствуют проектной прочности для упрочненного слоя – 62–69 МПа.

Такая картина распределения оценок прочности бетона для разных методов однозначно говорит о том, что в рассматриваемом случае ударно-импульсный метод, реализуемый прибором ИПС-МГ4, «принимает во внимание» прочность (твердость) верхнего упроч-

ненного слоя. ОМШ-1, имеющий значительно большую энергию удара, по сути, «проламывает» тонкий верхний твердый слой, за счет чего его оценка прочности снижается и приближается к значению прочности бетонной стяжки. Приведенные факты указывают на то, что оценка состояния бетона в конструкции каким-либо одним неразрушающим методом без учета «физики» процесса измерения не может быть объективной и достоверной.

Следует заметить, что в странах Евросоюза и США в перечне стандартизированных этого метода нет. Метод (приборы) ударного импульса можно рассматривать в качестве переходного этапа от методов упругого отскока и пластической деформации к методу динамического индентирования [30]. Сенсорные элементы приборов данного метода, при соответствующем алгоритме обработки сигнала, позволяют перейти от использования интегральных и амплитудных значений косвенных параметров к использованию массива их мгновенных значений.

6.4. Перспективные методы индентирования

Кинетическое индентирование

Как уже указывалось в начале раздела, предел кратковременной прочности бетона f_c является лишь параметрической точкой на диаграмме деформирования образца. Косвенные параметры рассмотренных выше методов упругого отскока, пластической деформации и ударного импульса также характеризуют лишь либо заключительные стадии процесса индентирования, либо отдельные его моменты, как в методе ударного импульса. Аналогично диаграмме деформирования стандартного бетонного образца, рассмотренной выше, значительно больше информации о процессе индентирования и, соответственно, о физико-механических свойствах контролируемого материала могла бы предоставить непрерывная регистрация всех стадий процесса внедрения индентора, включая мгновенное значение силы индентирования, мгновенное значение внедрения индентора, и скорости приложения нагрузки⁵⁰. Гипотетически можно предпо-

⁵⁰ Интерес к способам регистрации диаграммы вдавливания индентора в немалой степени стимулируется развитием нанотехнологий, где метод наноиндентирования проявляет себя одним из самых информативных для определения свойств микро- и наноструктур [15].

ложить, что получив такую диаграмму, из нее можно было бы получить больше информации и о «кубиковой» прочности бетона, тем самым приблизив оценку прочности склерометрическим методом к стандартной прессовой.

Идея перехода от измерения остаточных размеров отпечатка, возникающего под действием приложенной к индентору силы, к непрерывной регистрации диаграммы нагружения – так называемый *метод кинетического индентирования* – принадлежит российским ученым [2, 15]. Этот метод в наибольшей степени разработан для металлов и эластомеров [30]. Но разрабатываемые принципы и методики могут быть успешно использованы и для контроля строительных материалов. По мнению ряда исследователей [2] метод кинетического индентирования потенциально позволяет получить комплекс не только физико-механических, но и структурных характеристик материала.

Процесс кинетического индентирования отображается диаграммой в координатах «сила – внедрение». На рис. 6.20 приведен характерный вид диаграммы индентирования поверхности упруго-вязкопластичной среды.

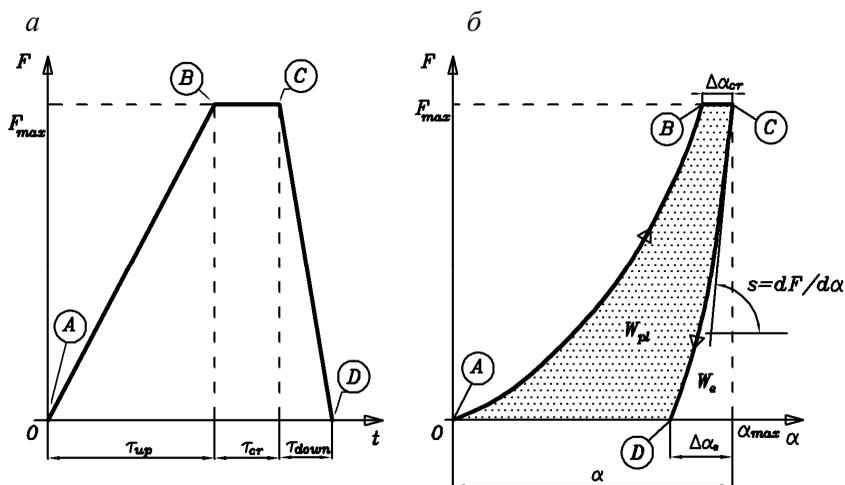


Рис. 6.20. Диаграммы кинетического индентирования:
 a – профиль нагружения; b – кинетическая диаграмма « $F - \alpha$ »:
 буквы в кружках – характерные точки на кривых нагружения
 и положения индентора относительно поверхности

На этапе А–В производится линейный рост нагрузки с постоянной скоростью dF/dt . На этом участке присутствует упругая и пластическая деформации. Стадия В–С – выдержка при максимальном значении силы F_{\max} , здесь проявляется свойство ползучести материала, происходит некоторое внедрение $\Delta\alpha_{cr}$ индентора при постоянной силе F_{\max} . Затем наступает стадия разгрузки С–D с постоянной скоростью. Стадия С–D отражает упругое деформирование зоны контакта.

Как было показано выше, из размерности твердости H [$\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$] следует, что твердость должна с точностью до постоянного коэффициента совпадать с затратами энергии на единицу объема восстановленного отпечатка – [$\text{Дж}\cdot\text{м}^{-3}$]. На диаграмме эта величина прямо пропорциональна площади W_{pl} . Аналогично можно рассматривать стадию упругого восстановления отпечатка. В этом случае модуль упругости E будет соответствовать с точностью до постоянного коэффициента приведенной к объему упругого восстановления отпечатка энергии W_e .

Имея техническую возможность измерить величину внедрения α и максимальное значение силы F_{\max} , получим реализацию метода пластической деформации. Имея возможность регистрации точек восходящей и нисходящей ветвей диаграммы, можем рассчитать энергии W_p и W_e . Взяв отношение $W_e/(W_e + W_p)$, сможем рассчитать коэффициент восстановления скорости индентора V_I/V_0 , что фактически реализует метод упругого отскока. То есть методы упругого отскока и пластической деформации являются частными случаями метода кинетического индентирования.

Определенную перспективу может представлять использование так называемых самоподобных инденторов, к которым относятся конические и пирамидальные инденторы. Самоподобие их выражается в том, что при любой величине внедрения такого индентора в однородный материал, соотношения пластических и упругих деформаций и характер их пространственного распределения в зоне индентирования будет оставаться постоянным. В этом случае восходящая ветвь А–В диаграммы будет представлять собой квадратичную параболу, поскольку сила внедрения будет прямо пропорциональна площади отпечатка. Любое отклонение от параболической формы будет указывать на неоднородность контролируемой среды по физико-механическим свойствам.

Применение различных профилей нагружения – трапецеидальной, треугольной, прямоугольной или ступенчатой формы, а также наложение колебаний малой амплитуды, многоциклового нагружение и др., позволяет в перспективе расширить диагностические возможности метода, повышая его селективность и чувствительность к различным физико-механическим показателям испытываемого материала.

Динамическое индентирование бетона

Реализация рассмотренной выше методики кинетического индентирования непосредственно в производственных условиях наталкивается на ряд технических проблем, в частности в измерении малых – десятые и сотые доли миллиметра – перемещений индентора с достаточной точностью и с обеспечением заданного профиля приложения силы внедрения. В качестве приемлемого практического решения такой задачи можно рассматривать метод динамического индентирования. До контакта с контролируемой поверхностью сам индентор или его массивная часть разгоняются до необходимой скорости. Внедрение индентора происходит за счет силы инерции так же, как в приборах методов упругого отскока и ударного импульса. Определить мгновенное значение силы внедрения индентора можно, зная его массу и мгновенное ускорение. Поэтому основной технической задачей при реализации метода динамического индентирования является определение параметров движения индентора – скорости и ускорения.

Особенностью динамического индентирования (рис. 6.21) является его ударный характер с быстрой сменой стадии внедрения и обратного хода. При массе индентора порядка 0,1–0,3 кг суммарное время взаимодействия имеет порядок нескольких сотен микросекунд. За такое короткое время свойства ползучести бетона не успевают себя проявить, но можно обнаружить проявление динамической вязкости.

Диаграмма кинетического индентирования при динамическом внедрении индентора включает в себя две ветви: активную I, отображающую процесс внедрения индентора в бетон, при котором скорость индентора снижается от максимума в точке 0 до нуля в точке 2, и пассивную II, когда происходит «отскок» индентора, скорость движения меняет знак. В начальной стадии взаимодействия – участок кривой 0–1 – имеет место упругое взаимодействие сферичес-

кого индентора с поверхностью бетона. На участке 1–2 (см. рис. 6.21) к упругому деформированию зоны контакта «подключается» пластическое смятие бетона. Характер зависимости $F(\alpha)$ становится более плавным, приближаясь к линейному. После достижения максимальной величины внедрения α_{max} начинается процесс «отскока». На этом этапе характер участка 3–4 ветви диаграммы определяется упругим взаимодействием индентора и бетона. Разгрузка бетона в зоне контакта происходит до момента, соответствующего точке 4 диаграммы. Величина α_n определяет глубину отпечатка, оставшегося после удара индентора. Информационным является также и участок 2–3 диаграммы, который присущ только процессу динамического деформирования. Характер участка 2–3 указывает на проявление динамической вязкости бетона: наблюдается увеличение деформирования зоны контакта при снижении контактной силы.

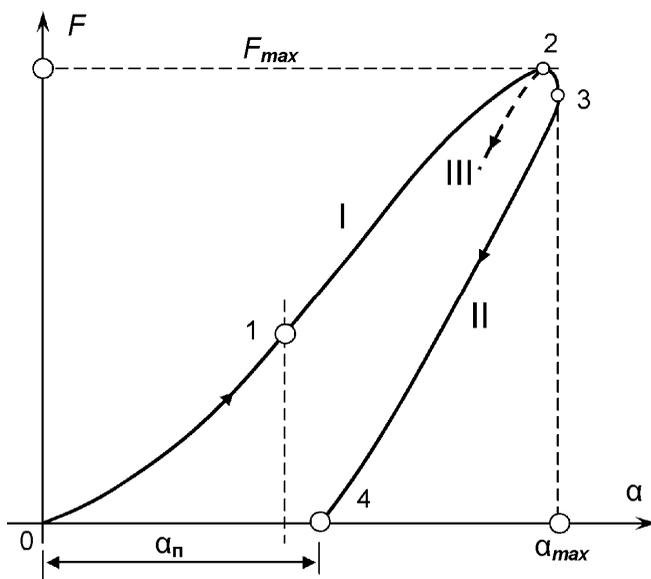


Рис. 6.21. Зависимость контактного усилия F от внедрения α в процессе динамического индентирования бетона

Для случая статического (медленного) внедрения индентора в бетон или при отсутствии вязкости бетона этого участка не было бы

(см. рис. 6.20, б), и этап разгрузки зоны контакта соответствовал бы участку III диаграммы.

На рис. 6.22, а показан прибор ИПМ-1А метода динамического индентирования разработки ИПФ АН РБ [22], а на рис. 6.22, б – структурная схема его измерительного тракта.

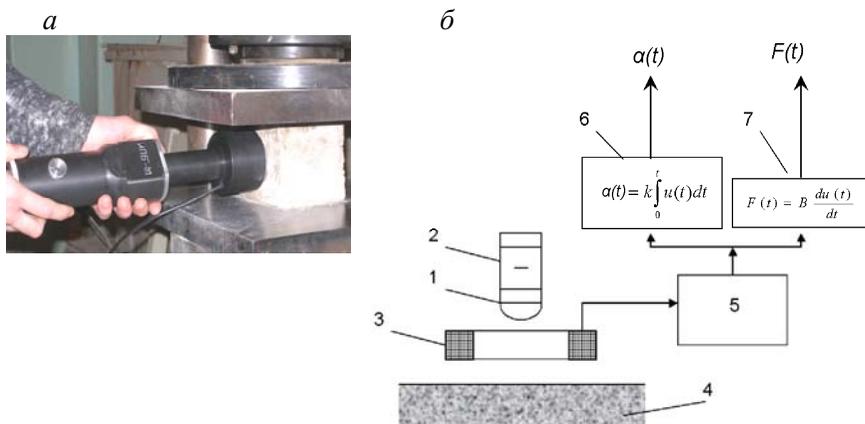


Рис. 6.22. Прибор ИПМ-1А:

- а – градуировочные испытания; б – схема измерительного тракта;
 1 – индентор; 2 – постоянный магнит; 3 – катушка индуктивности;
 4 – контролируемый участок бетона; 5 – блок усиления и фильтрации;
 6, 7 – каналы вычислительного блока

Исходным сигналом прибора является ЭДС $u(t)$, наведенная в катушке индуктивности 3 установленным в инденторе 1 постоянным магнитом 2. Мгновенное значение ЭДС будет прямо пропорционально скорости изменения магнитного потока в катушке. При небольших – доли миллиметра – перемещениях индентора внутри катушки мгновенная скорость изменения магнитного потока будет прямо пропорциональна мгновенной скорости движения V индентора. Таким образом, сигнал $u(t)$ индуктивного датчика прибора будет с точностью до постоянного коэффициента пропорциональности равен скорости движения индентора V .

После усиления и оцифровки сигнала $u(t)$ производится автоматическое вычисление его производной и интеграла по переменной времени t (см. рис. 6.22, б). Поскольку $u(t)$ прямо пропорционально ско-

рости индентора V , то $du(t)/dt$ будет прямо пропорционально ускорению индентора и, соответственно, силе индентирования $F(t)$ ⁵¹.

Интеграл $u(t)$ по переменной времени t будет прямо пропорционален перемещению индентора, то есть – его внедрению α в бетон.

Таким образом, сигнал $\alpha(t)$ соответствует мгновенному значению внедрения индентора, а сигнал $F(t)$ – мгновенному значению силы индентирования. Зарегистрировав массивы значений сигналов $\alpha(t)$ и $F(t)$, сможем построить диаграмму кинетического индентирования $F(\alpha)$ (см. рис. 6.21).

На рис. 6.23 приведены временные диаграммы сигнала датчика скорости индентора, полученные экспериментально при испытании образцов бетона с различными соотношениями модуля упругости и предела прочности на сжатие.

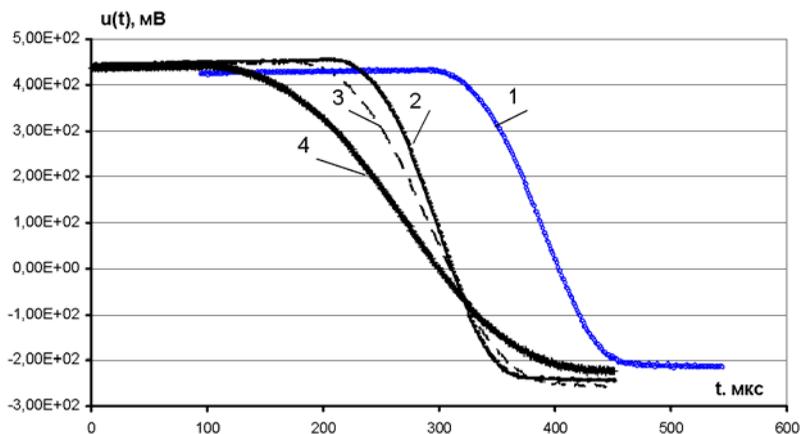


Рис. 6.23. Временные диаграммы сигнала датчика скорости индентора для бетона с различными соотношениями модуля упругости и предела прочности на сжатие:

1 – $E = 43$ ГПа; $f_{c,cube} = 76$ МПа; 2 – $E = 39,5$ ГПа; $f_{c,cube} = 73,5$ МПа;

3 – $E = 22$ ГПа; $f_{c,cube} = 32$ МПа; 4 – $E = 14$ ГПа; $f_{c,cube} = 19$ МПа

По данным массива значений $u(t)$ рассчитывается массив значений контактной силы $F(t)$. На рис. 6.24 приведены диаграммы зави-

⁵¹ Заметим, что сигнал $F(t)$ использован в основе измерительного алгоритма метода ударного импульса (см. рис. 6.15, б). Это означает, что метод ударного импульса, как и метод пластической деформации и метод упругого отскока, составляет подсистему метода динамического индентирования.

симости силы индентирования от времени, а на рис. 6.25 – силы F от глубины внедрения индентора α .

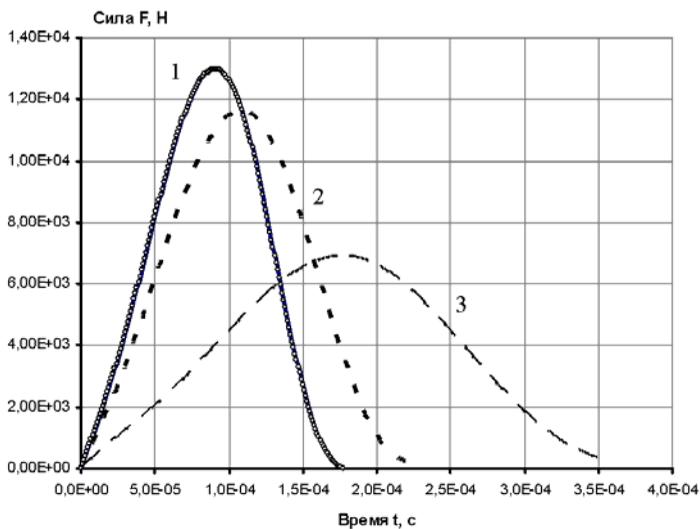


Рис. 6.24. Экспериментальные диаграммы зависимости контактной силы от времени

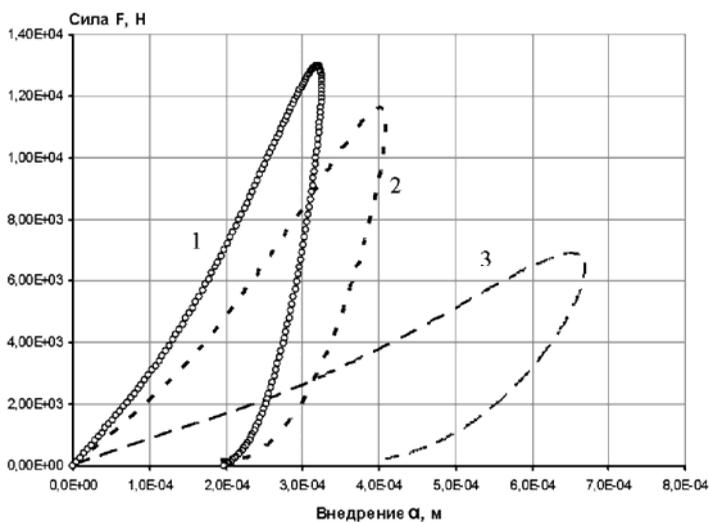


Рис. 6.25. Экспериментальные диаграммы зависимости контактной силы от глубины внедрения

Метод непрерывной регистрации диаграммы вдавливания позволяет по показателям твердости бетона и кинетики внедрения сферического индентора определить прочность и модуль упругости бетона, являющийся одним из важнейших показателей деформируемости бетонных конструкций. Авторами метода вводится новая характеристика прочности бетона HR , рассчитываемая из следующего выражения:

$$HR = \frac{HD}{e^n}, \quad (6.9)$$

где HD – динамическая твердость, рассчитываемая по формуле

$$HD = \frac{F_{\max}}{\pi D \alpha_{\max}}, \quad (6.10)$$

где F_{\max} – максимальная сила динамического индентирования;
 n – коэффициент, зависящий от диаметра индентора D и энергии удара W ;
 e – коэффициент восстановления скорости индентора

$$e = V_0 / V_{\text{end}}, \quad (6.11)$$

где V_0 – скорость индентора до соприкосновения с поверхностью бетона;

V_{max} – скорость индентора непосредственно после контакта с поверхностью.

По динамической твердости и коэффициенту восстановления скорости индентора можно определить динамический модуль упругости [23]:

$$E_D = \frac{1 - \nu_2^2}{\left(1,12 \left(\frac{2+n}{2} \right)^{\frac{3}{4}} \frac{D^{\frac{3}{4}}}{W_0^{\frac{1}{4}}} HD^{\frac{5}{4}} \right) e^2 - \frac{1 - \nu_1^2}{E_1}}, \quad (6.12)$$

где W_0 – предударная энергия индентора;

n – коэффициент, характеризующий способность бетона к упрочнению;

ν_1 и E_1 – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала индентора;

ν_2 – коэффициент Пуассона бетона.

Зависимости (6.9) и (6.12) являются, по существу, алгоритмом комбинированного многопараметрового контроля, косвенными параметрами которого являются коэффициент восстановления скорости индентора e , диаметр и предупредная энергия индентора D и W_0 .

Коэффициент восстановления скорости индентора e , в большей степени, чем другие параметры индентирования, характеризует упругие свойства материала. Показатель HR обладает высокой чувствительностью к прочности бетона на одноосное сжатие f_c . Поэтому учет коэффициента восстановления скорости индентора в формуле (6.9) позволяет скомпенсировать влияние на оценку прочности бетона неоднозначно связанного с ней модуля упругости.

Данные натурных испытаний показывают повышенную эффективность предложенной методики при контроле бетонов высокой прочности – $f_c > 40$ МПа. На рис. 6.26 приведены зависимости показателя разброса оценок прочности, полученные при использовании в качестве косвенного параметра показатель HR и значение максимальной силы индентирования F_{\max} .

Разработанная методика позволяет, по заявлению авторов, определять прочность бетона с погрешностью не более 10 % в диапазоне 10–40 и 60–90 МПа и не более 12 % в диапазоне 40–60 МПа без внесения коррекции для конкретного класса бетона.

Таким образом, рассмотренная конструкция может рассматриваться как универсальная аппаратная основа для реализации контроля бетона методом динамического индентирования⁵². Программно изменяя алгоритм обработки сигналов, прибор динамического индентирования позволяет создавать «виртуальные» приборы традиционных методов пластической деформации, упругого отскока и ударного импульса. Но перспективность метода динамического ин-

⁵² Термин «метод динамического индентирования» пока в большей степени может быть отнесен к способу регистрации косвенных параметров индентирования, чем к методу определения прочности или иных физико-механических характеристик бетона, поскольку потенциальные возможности этого метода не исчерпываются формулами (6.9), (6.12), включающими в себя лишь экстремальные значения из всего массива данных.

дентирования заключается не в моделировании известных методов испытаний, а в возможности получения большего объема информации о состоянии контролируемого материала.

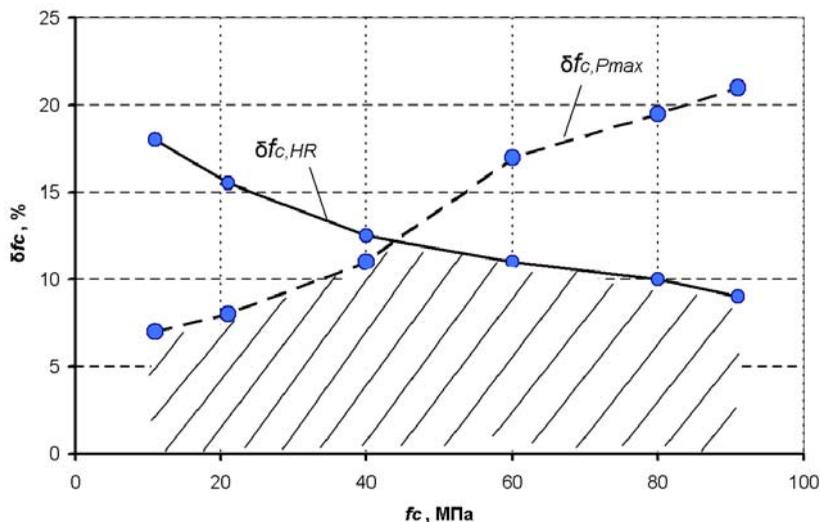


Рис. 6.26. Зависимости погрешности δf_c определения прочности бетона индентированием от его прочности f_c :

$\delta f_{c, P_{max}}$ — погрешность определения прочности по контактному усилию;
 $\delta f_{c, HR}$ — погрешность определения прочности по характеристике HR

* * *

Сопоставляя рассмотренные механические неразрушающие методы испытаний бетона, можно заметить, что чем больший объем бетона конструкции подвергается испытательному разрушению тем или иным методом, тем большая степень совпадения результата испытаний данным методом будет с данными прессовых испытаний бетонных образцов. Если в качестве «истинной» прочности бетона рассматривать результаты разрушающих испытаний образцов (кубов, призм, цилиндров), то в наибольшей степени адекватными им в своих оценках являются методы отрыва. Важнейшим достоинством данной группы методов является слабая подверженность их оценок прочности влиянию технологических факторов бетона: изменению состава,

условий укладки и режима твердения. Это позволяет рекомендовать эти методы локальных разрушений для экспертных оценок прочности бетона отдельных участков изделий; для «сопровождения» испытаний, выполняемых с привлечением иных, более оперативных методов контроля, с целью оценки достоверности их данных и уточнения градуировочных зависимостей.

Сложившаяся классификация механических методов испытания бетона в конструкциях (см. рис. 6.27) отражает не только физику измерительного процесса, но и процесс постепенного расширения возможностей исследователей и конструкторов приборных средств в использовании выбранных ими косвенных информационных параметров.



Рис. 6.27. Классификация механических методов неразрушающих испытаний бетона конструкций

Если в «доэлектронный» период развития приборных средств можно было измерить лишь некоторые механические параметры (размеры отпечатка, высоту отскока, силу отрыва), то современная измерительная технология изменилась кардинально: измерить можно практически все. Стал очевидным тот факт, что никакой одиночный

параметр неразрушающих методов не является адекватным «кубиковой» прочности бетона или его модулю упругости в том диапазоне вариации технологических факторов, которые имеют место на строительной площадке. Каждый из измеряемых параметров инденторных методов является отображением комплекса физико-механических характеристик бетона, включая прочность (предельное напряжение), характеристики его упругости и пластичности. Степень превалирования тех или иных упруго-прочностных характеристик бетона в полученном значении косвенного параметра зависит от ряда факторов, в первую очередь к ним относятся технологические факторы бетона: состав, условия уплотнения и выдерживания, температурные воздействия.

Во вторую очередь проявляют себя энергия удара, масса и форма индентора, время его взаимодействия с бетоном. В результате одно и то же значение косвенного параметра можно получить при различной фактической прочности бетона. Таким образом, если методы отрыва являются практически *технологонезависимыми* (формулы (6.2) и (6.3)) и не требуют подбора градуировочных зависимостей при изменении состава бетона и условий бетонирования, то ни один из стандартизированных склерометрических методов этим свойством не обладает. Но считать эти свойства склерометрических методов их недостатком не следует, это – их особенность⁵³. По физике измерительного процесса рассмотренные склерометрические методы являются методами измерения твердости H_c бетона⁵⁴, которая наряду с пределом кратковременной прочности f_c также является прочностной характеристикой бетона. Разумеется, уравнивать твердость и прочность какими-либо коэффициентами невозможно. Какая из этих двух характеристик является более адекватной несущей способности бетонной или железобетонной конструкции – вопрос дискуссионный, и однозначный ответ на него вряд ли существует. Но поскольку

⁵³ Особенностью склерометрических методов также является то, что регистрируемый косвенный параметр является характеристикой не контролируемого материала, а системы «контролируемый материал – измерительный прибор». Это создает некоторые метрологические проблемы: градуировочная зависимость для одного прибора не может быть применена к другому, даже близкому по конструкции.

⁵⁴ *Склерос* (греч.) – *твердый*.

в сложившейся системе нормирования в строительстве «истинной» прочностью бетона считается предел кратковременной прочности образца f_c при его одноосном сжатии, то задача совершенствования неразрушающих методов испытаний – максимально приблизить получаемую оценку прочности к ее стандартному значению в условиях вариации тех технологических факторов, которые имеют место в построечных условиях.

Существуют два пути решения этой задачи. Первый – традиционное использование «букета» градуировочных зависимостей и поправочных коэффициентов, подобранных для каждого состава и технологии бетона. Второй – использование расширенного перечня косвенных параметров и «тонких» методик обработки данных на основе комбинирования косвенных параметров с включением в измерительный комплекс параметров, обладающих различной степенью чувствительности к механическим характеристикам бетона, из совокупности которых удастся получить информацию о так называемой кубиковой прочности. Потенциально, второй путь позволяет подойти к созданию безобразцовых методов и приборов контроля механических свойств бетона.

При знакомстве со склерометрическими методами испытания бетона и методами испытания металлов становятся очевидными их общие физические принципы. Методы определения твердости металла по Бринеллю и Шору являются прямыми аналогами для методов пластической деформации (молоток Кашкарова) и метода упругого отскока (молоток Шмидта). Такого рода параллель просматривается и в развитии склерометрических методов, в частности, рассмотренный метод динамического индентирования «универсален» и для контроля металла, и для полимеров, и для бетона.

Испытания индентированием, как способы неразрушающего контроля, охватывают в настоящее время области макро-, микро- и наноиндентирования. Линейный размер очага пластической деформации при этом изменяется более чем в 1000 раз, а объем – более чем в 10^9 раз. Сопrotивление пластической деформации в этом интервале масштабов становится зависимым от структуры материала соответствующего масштаба.

С позиций теории упругости, задача формализации взаимосвязи параметров индентирования упруго-пластичных материалов с их физико-механическими характеристиками нетривиальна, и на данный

момент она не получила исчерпывающего аналитического решения. Тем не менее, анализ даже упрощенных моделей процесса индентирования бетона позволяет получить важные для практики результаты.

7. КОНТРОЛЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Физической основой акустических методов испытаний строительных материалов и готовых конструкций является зависимость параметров распространяющихся в них механических колебаний как от интегральных упругопрочностных показателей бетона – модуля упругости E_c , прочности на сжатие f_c , так и от характера присутствующих макродефектов в массиве конструкции – трещин, пустот, пор. Важным качеством акустических методов является также возможность их использования для определения концентрации и характера структурных микродефектов.

Распространение механических колебаний в упругом материале происходит в виде акустических волн (рис. 7.1).

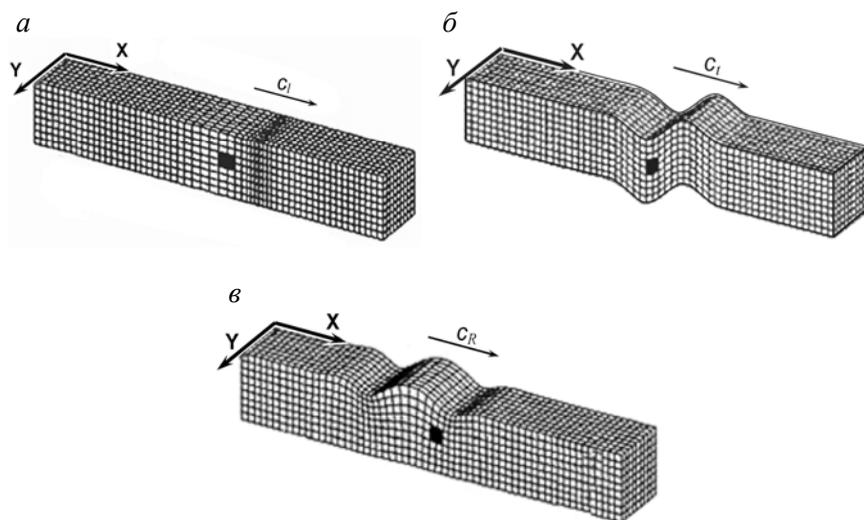


Рис. 7.1. Характер волновых процессов в твердом теле:
а – продольная волна; б – поперечная волна; в – поверхностная волна

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}; \quad (7.1)$$

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \approx 0,55c_l; \quad (7.2)$$

$$c_R = \frac{0,85 + 1,12\nu}{1 + \nu} c_l \approx 0,93c_l. \quad (7.3)$$

В объеме твердого упругого материала могут распространяться два типа волн: продольные (волны сжатия) и поперечные (сдвиговые). Продольные волны вызывают колебания частиц материала вдоль направления их распространения, поперечные – поперек. На границе раздела двух сред, в частности бетона и воздуха, распространяется поверхностная волна (волна Релея), которая локализуется в приповерхностной зоне (рис. 7.1, в). Особенностью волны этого типа является низкое затухание при распространении и малая глубина проникновения в бетон. Скорость c_R волны Релея близка к скорости поперечной волны – $c_R \approx 0,93c_t$. Траектория колебаний частиц среды для волны Релея – эллипс. В практике испытаний бетонных и железобетонных конструкций в основном применяются продольные и поперечные волны.

Скорости распространения волн относятся к основным акустическим характеристикам материала и связаны с динамическим модулем упругости материала E , коэффициентом Пуассона ν и плотностью материала ρ соотношениями (7.1)–(7.3).

По назначению акустические методы контроля бетона разделяют на методы контроля его физико-механических свойств и методы дефектоскопии (рис. 7.2)⁵⁵.

По способу создания и регистрации акустических волн методы контроля обычно подразделяют на методы прохождения, методы свободных колебаний и эмиссионные.

⁵⁵ Из всех акустических методов государственными стандартами – ГОСТ 17624–2012 и СТБ EN 12504-4–2014 – регламентирован только ультразвуковой импульсный метод контроля бетона, относящийся к методам прохождения.

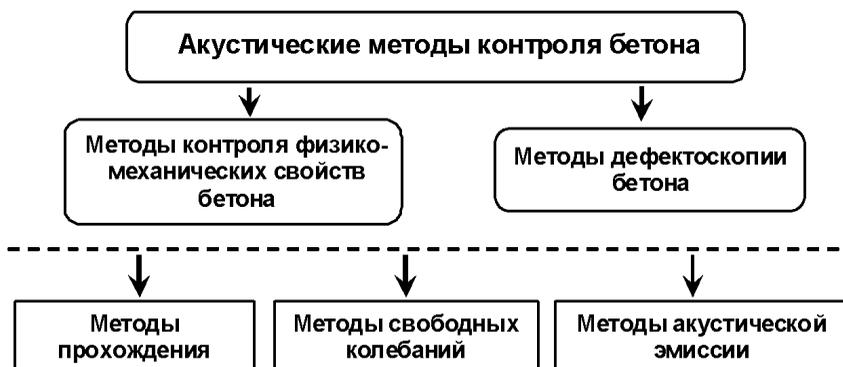


Рис. 7.2. Классификация акустических методов контроля бетона и железобетонных конструкций

Все акустические методы контроля бетона являются в своем современном виде низкоэнергетическими. К примеру, упругая деформация бетона в зоне излучающего преобразователя для типовых ультразвуковых приборов метода прохождения составляет 2–10 мкм. Для продольной волны максимальная относительная деформация (сжатия и растяжения) упругой среды будет иметь место на интервале $l = \lambda/4$, где λ – длины волны распространяющихся колебаний. Оценить порядок энергетического воздействия типового ультразвукового излучателя на бетон можно исходя из следующих соотношений:

$$\sigma_{US,\max} \approx \frac{\Delta u}{\lambda/4} E_c; \quad (7.4)$$

$$q_{US,\max}^* \approx \frac{\sigma_{US,\max} (\lambda/4)^2 \Delta u}{(\lambda/4)^3 (T_{US}/4)} = \frac{\sigma_{US,\max} \Delta u}{(\lambda/4)(T_{US}/4)} = 64 f_{US} E_c \frac{\Delta u^2}{\lambda^2}, \quad (7.5)$$

где $\sigma_{US,\max}$ – максимальное напряжение, Н·м⁻²;

$q_{US,\max}^*$ – максимальная мгновенная мощность, приходящаяся на единицу объема, Вт·м⁻³;

E_c – модуль упругости, $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$;

λ – длина волны колебаний, м;

T_{US}, f_{US} – соответственно период и частота ультразвуковых колебаний;

Δu – амплитуда смещения частиц бетона при прохождении волны, м.

Подставив в формулы (7.4) и (7.5) типичные значения параметров $\Delta u = 5 \cdot 10^{-6}$ м, $E_c = 25 \cdot 10^9$ Па, $f = 10^5$ Гц, $\lambda = 4 \cdot 10^{-2}$, получим

$$\sigma_{US, \max} \approx \frac{5 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 10^{-2} / 4} 25 \cdot 10^9 = 12,5 \cdot 10^6, \text{ Па};$$

$$q_{US, \max}^* \approx 64 \cdot 10^5 \cdot 25 \cdot 10^9 \frac{(5 \cdot 10^{-6})^2}{(4 \cdot 10^{-2})^2} = 2,5 \cdot 10^9, \text{ Вт/м}^3.$$

Ориентировочный расчет энергетического воздействия молотка Шмидта сделаем на основе следующих соображений. Примем, что напряжение в пятне индентирования бетона равно пределу прочности бетона $\sigma_c = f_c = 30$ МПа, а время τ от момента контакта индентора до достижения максимального внедрения составляет 10^{-3} с. Переход от силовых параметров индентирования к энергетическим сделаем формально: умножением и делением максимального напряжения на параметр длины по формуле

$$q_{Sh, \max}^* \approx \sigma_c \frac{L}{L\tau} = \frac{30 \cdot 10^6}{10^{-3}} = 3 \cdot 10^{10}, \text{ Вт/м}^3.$$

Из полученных результатов следует, что энергетическое воздействие молотка Шмидта более чем на порядок превосходит этот показатель для ультразвука.

По максимальному напряжению в зонах взаимодействия с бетоном ультразвуковой метод прохождения соизмерим с молотком Шмидта. Для «хорошего» акустического контакта с бетоном и близком к предельному режиму возбуждения акустических преобразова-

телефон напряжение в зоне их прилегания к бетону соизмеримо с разрушающим. Следствием этого могут стать нелинейные акустические эффекты, например, зависимость скорости распространения колебаний от излучаемой мощности, а также появление высших гармоник в спектре акустического сигнала.

В то же время для излучающего преобразователя с точечным сухим контактом реальные силовые и энергетические показатели будут значительно ниже из-за влияния податливости самого точечного контакта и его малых размеров – долей квадратного миллиметра. Рассчитанное значение $\sigma_{US,max}$ и нелинейные эффекты деформации могут иметь место лишь в непосредственной близости к «точке» самого контакта, размеры которой несоизмеримы с базой прозвучивания ультразвукового метода прохождения, а значит и не окажут заметного влияния на оценку скорости распространения ультразвукового импульса.

Что касается других акустических методов, в частности вибрационно-акустического, Impact-Echo и аналогичных по физической основе, то в зоне ударной инициации колебаний напряжения и удельная мощность будут соизмеримы с этими показателями склерометрических методов. Но поскольку оценке подвергаются параметры акустической волны, прошедшей через большой объем контролируемой конструкции, то, как и для ультразвуковых методов прохождения, зоны пластического деформирования бетона, в силу их малого объема, не будут оказывать заметного влияния на распространение акустических волн. Напряжения в зоне распространения волн будут на несколько порядков ниже значений в точках их возбуждения. Данное обстоятельство указывает на то, что параметры акустических методов не имеют прямой физической зависимости от показателей прочности бетона, а определяются главным образом его упругими свойствами.

Надо заметить, что действующие нормативы, регламентирующие акустический контроль, не оговаривают тип используемых волн. Но фактически поперечные волны сегодня используются только в низкочастотной ультразвуковой томографии (дефектоскопии) массивных бетонных конструкций. Во всех остальных случаях применяются продольные волны. Сказанное не означает, что создается только оговоренный тип волны и только она присутствует в контролируемом материале. Возбуждение упругих волн в бетоне осу-

ществляется силовым (импульсным или квазигармоническим с небольшим числом периодов) воздействием на небольшую по площади область поверхности изделия. В этом случае одновременно формируется несколько типов волн, распространяющихся от зоны возбуждения с разной скоростью и разными преимущественными направлениями. Зачастую выделить колебания какого-либо выделенного типа волны в общей интерференционной картине акустического поля в контролируемом изделии бывает очень сложно. Проще всего регистрировать тот сигнал, который придет к приемному преобразователю самым первым. Из всех типов упругих волн в массиве быстрее всех (см. рис. 7.1) распространяется продольная волна. Именно по этой причине продольная волна чаще всего и используется для диагностики.

7.1. Методы свободных колебаний (natural oscillation frequencies (NOF))

Физическая основа этой группы методов – связь частотного спектра свободных или в отдельных случаях вынужденных механических колебаний контролируемого образца или конструкции с ее физико-механическими и геометрическими параметрами. Длина волны свободных колебаний в элементе конструкции определяется размерами этого элемента. Минимальная частота $f_{1,T}$ стоячей волны, соответствующей первому резонансу данного элемента толщиной T , определяется соотношением

$$f_{1,T} = \frac{c}{2T}, \quad (7.6)$$

где c – скорость распространения упругой волны в контролируемом материале.

Impact-Echo метод (IEM)

Одним из распространенных вариантов метода свободных колебаний в практике испытаний бетонных и железобетонных конструкций является так называемый *Impact-Echo* метод (IEM). Несмотря

на присущие ему недостатки, ИЕМ приобрел немалую популярность в странах Евросоюза и США [39]. Физическая основа ИЕМ заключается в зависимости *амплитудно-частотных* параметров акустического отклика на кратковременное ударное воздействие с небольшой энергией от физико-механических параметров испытуемого материала – бетона. Типичный комплект прибора метода ИЕМ представлен на рис. 7.3.



Рис. 7.3. Типичный комплект системы для оценки состояния бетонных изделий Impact-Echo методом (<http://www.impact-echo.com>)

Основными косвенными параметрами метода являются длительность отклика и соотношения основных частотных составляющих спектра затухающих колебаний. Для визуализации акустического сигнала и его анализа используют, как правило, спектральные методы и соответствующие компьютерные программы на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Возбуждение колебаний в бетоне обычно производится специальным ударным механизмом либо вручную – нанесением удара металлическим шариком малой массы по поверхности конструкции (рис. 7.4).



Рис. 7.4. Возбуждение колебаний механическим ударом

Прием колебаний осуществляется пьезоэлектрическими или электродинамическими датчиками (рис. 7.5).



Рис. 7.5. Приемные акустические преобразователи:
a – цилиндрический – для выявления неоднородностей и оценки упруго-прочностных характеристик бетона;
б – сдвоенный – для оценки скорости акустической волны
(<http://www.impact-echo.com>)

При отсутствии дефекта после ударного воздействия в зоне контроля образуется акустическое поле, основные составляющие которого имеют частоты, кратные частоте полуволновых колебаний, которая является опорной $f_{1,T}$ и связана соотношением со скоростью распространения продольной волны c и расстоянием T .

На рис. 7.6 показан «снимок» волнового процесса в плите без дефектов, построенный по данным КЭ моделирования на момент, когда фронт импульса поперечной волны достиг донной поверхности плиты.

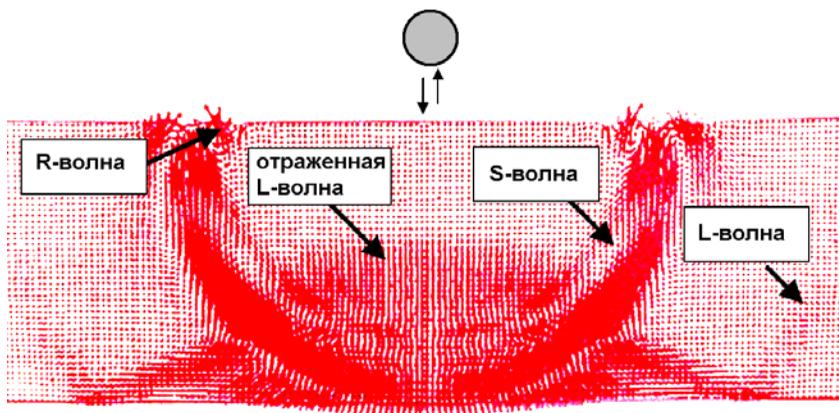


Рис. 7.6. Акустическое поле в зоне ударного возбуждения колебаний

К этому моменту фронт продольной волны, отраженной от дна, уже находится в середине изделия. Хорошо заметен лидирующий фронт импульса падающей продольной волны. На рис. 7.6 показана начальная стадия процесса – стоячая волна между плоскими гранями плиты еще не сформировалась. Она проявит себя после нескольких переотражений импульса продольной волны от верхней и нижней граней плиты. Фильтрующие свойства бетона по отношению к частотным составляющим импульса волны приведут к быстрому затуханию ее высокочастотных компонент и установлению квазистационарного режима затухающей стоячей волны с частотой первой гармонической составляющей резонансных колебаний по толщине плиты. В зависимости от размеров и формы изделия, упругих свойств бетона, присутствия крупных дефектов, а также массы ударника, изменяется частотный спектр отклика, меняются временные параметры его отдельных участков. Как правило, частотный спектр отклика простирается от единиц килогерц до 60...80 кГц. Наличие дефекта обогащает частотный спектр составляющими, частота которых определяется глубиной дислокации дефекта d ,

$$f_{1,d} = \frac{c}{2d}, \quad (7.7)$$

а амплитуда зависит главным образом от размеров, формы и ориентации по отношению к фронту волны (рис. 7.7).

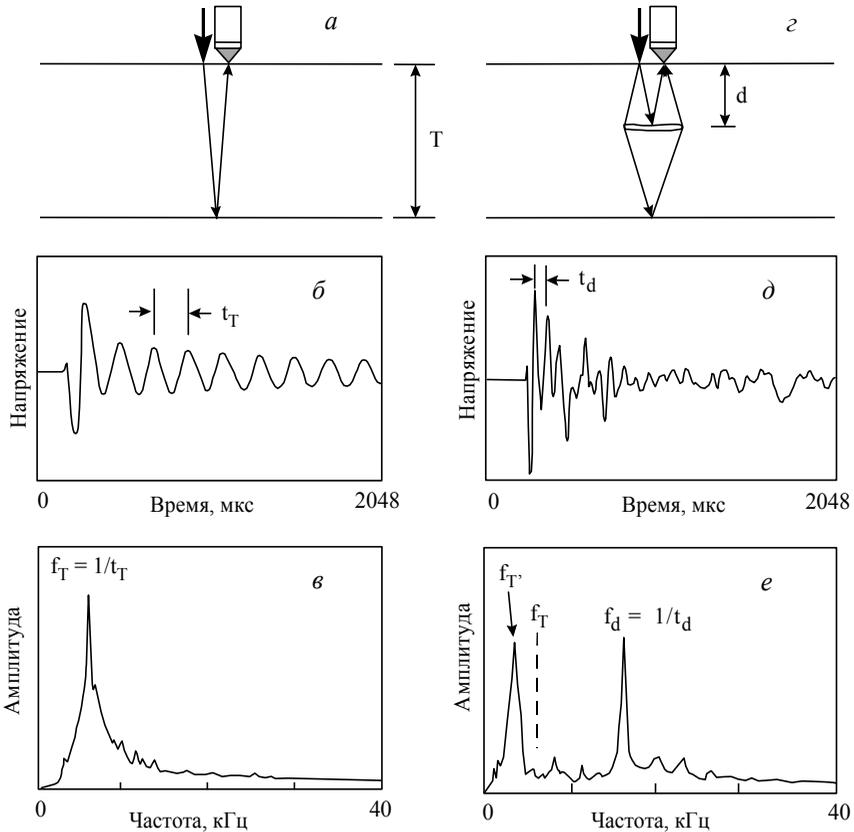


Рис. 7.7. Сравнение акустического отклика при отсутствии дефекта в зоне контроля (слева) и при наличии дефекта:
a, z – схемы контроля; *б, д* – временные диаграммы сигналов откликов;
в, е – частотные спектры сигналов

На рис. 7.8 показан частотный спектр колебаний стоячей волны в бетонной плите толщиной 25 см без дефектов сплошности (верхний

рисунок) и с дефектом расслоения (нижний рисунок). Частота 7800 Гц соответствует скорости продольной волны в массиве $3900 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Резонансный пик на частоте 20 500 Гц (нижний рисунок) соответствует протяженному дефекту сплошности на глубине 9,5 см от поверхности плиты.

ИЕМ высоко эффективен для обнаружения скрытых под поверхностью дефектов: трещин, расслоений, пустот, причем на достаточно большой глубине – до 1–5 метров, что в первую очередь обусловлено использованием низких частот колебаний, имеющих малое затухание в бетоне.

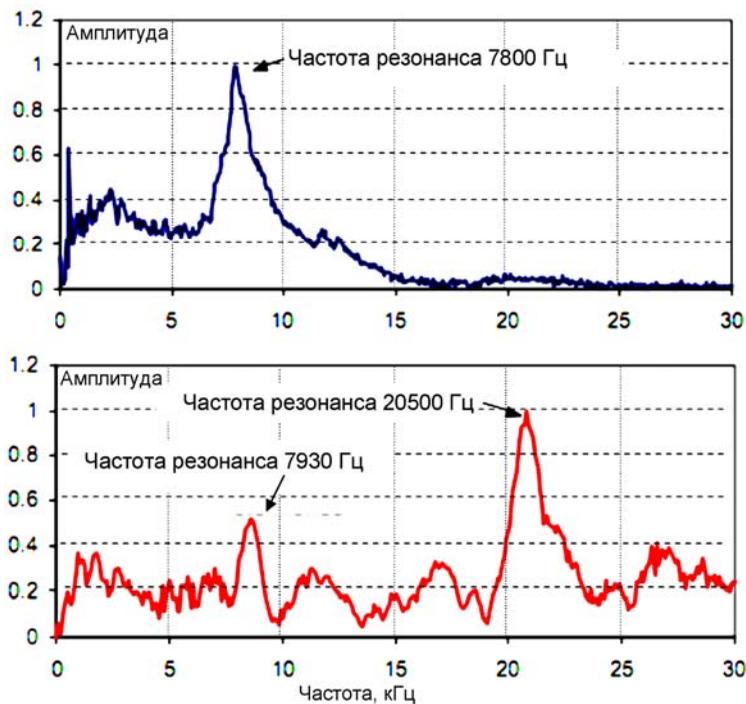


Рис. 7.8. Частотные спектры акустических откликов для монолитной плиты перекрытия толщиной 25 см в бездефектной зоне (верхняя диаграмма) и в зоне расслоения бетона (нижняя диаграмма)

Распространение и распределение упругих деформаций в объеме контролируемой конструкции при ударном возбуждении является нестационарным процессом. В момент удара сферического инден-

тора в области его контакта с бетоном возникает кратковременный импульс силы, характер изменения во времени которой может быть описан половиной периода синусоиды. Длительность импульса может быть приблизительно определена по формуле [16]

$$\tau_c = 2,87 \left(\frac{m^2}{RE^* V_Z} \right)^{1/5}, \quad (7.8)$$

где m – масса сферического ударника;

R – его радиус;

V_Z – скорость сближения;

E^* – приведенный модуль упругости, определяемый по формуле

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{E_1^*} + \frac{1}{E_2^*};$$

E_1^* , E_2^* – приведенные модули упругости испытуемого материала и материала сферического индентора соответственно.

Для примера рассчитаем длительность удара стальным шариком ($\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $R = 5 \text{ мм}$) по поверхности бетона ($E^* = 30 \cdot 10^9 \text{ Па}$), скорость сближения примем $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$:

$$\tau_c = 2,87 \left(\frac{(4,1 \cdot 10^{-3})^2}{5 \cdot 10^{-3} \cdot (30 \cdot 10^9)^2 \cdot 1} \right)^{1/5} = 5,91 \cdot 10^{-5}, \text{ с.}$$

Характеристическая частота f_{\max} , соответствующая максимуму частотного спектра, составит $f_{\max} = 1/(2\tau_c) = 8,46 \text{ кГц}$. При скорости распространения акустического импульса $4000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ можем рассчитать толщину T_d бетона в зоне расположения дефекта, для которой полученное значение времени будет соответствовать половине периода стоячей волны:

$$T = V_l \tau_c = 4000 \cdot 5,9 \cdot 10^{-5} \approx 24 \cdot 10^{-2}, \text{ м.}$$

В рассмотренном примере режим стоячей квазигармонической волны установится за пару периодов. В бетонном изделии, имеющем толщину значительно большую, чем 24 см, импульс длительностью

59 мкс может несколько раз переотразиться от граней конструкции, постепенно затухая, так и не трансформируясь в стоячую волну с выраженной частотной составляющей спектра. В таких случаях более эффективным может оказаться временное представление эхо-сигнала, аналогично тому, как это реализуется виброакустическим методом. Это также означает, что для формирования выраженных частотных компонент спектра выбор размеров и массы ударника необходимо делать, руководствуясь ориентировочной глубиной поиска дефекта. Для большей глубины поиска следует использовать более низкие частоты и, соответственно, ударники большей массы.

Использование низких частот для обнаружения дефектов бетонного массива повышает «дальнобойность» ИЕ-метода, но имеет и обратную сторону: чем ниже частота акустических колебаний, тем большего размера должен быть дефект для создания эффекта отражения и образования стоячей волны⁵⁶. ИЕ-метод эффективен для обнаружения дефекта, линейные размеры которого соизмеримы с расстоянием от него до поверхности. Если принять минимальный размер обнаруживаемого дефекта $\lambda/4$, то диапазон рабочей области ИЕ-метода – «слепую» зону – можно отобразить графически (рис. 7.9) в виде сектора с вершиной в точке возбуждения зондирующих колебаний.

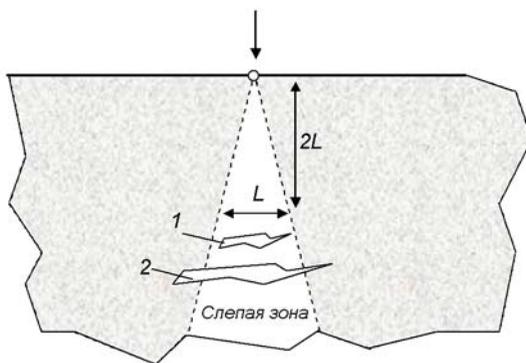


Рис. 7.9. Рабочая область ИЕ-метода:

1 – дефект с малой вероятностью обнаружения; 2 – обнаруживаемый дефект

⁵⁶ Для обнаружения малоразмерных дефектов на большой глубине используют ультразвуковые дефектоскопы-томографы. В этих приборах используется принцип импульсной локации поперечными волнами, длина которых составляет 3–8 см.

Используя режим временного представления акустического сигнала, приборы ИЕМ позволяют определить скорость распространения импульса подповерхностной и поверхностной волн. Используются два приемных преобразователя (см. рис. 7.5, б), устанавливаемых на одной линии с точкой возбуждения импульса. Информационным параметром является временной интервал между моментами регистрации импульса каждым из преобразователей⁵⁷. На основе такой методики измерений возможно определение глубины поверхностных трещин путем сравнения времени прохождения фронта волны для бездефектной зоны и в зоне трещины (рис. 7.10). Разница во времени появления фронтов сигналов t_1 и t_2 связана с геометрией трещины. Глубина трещины рассчитывается по такой же формуле, как и для ультразвукового импульсного метода [33]:

$$D = \frac{AC}{2} \sqrt{\left(\frac{t_2}{t_1} - 1\right)^2}. \quad (7.9)$$

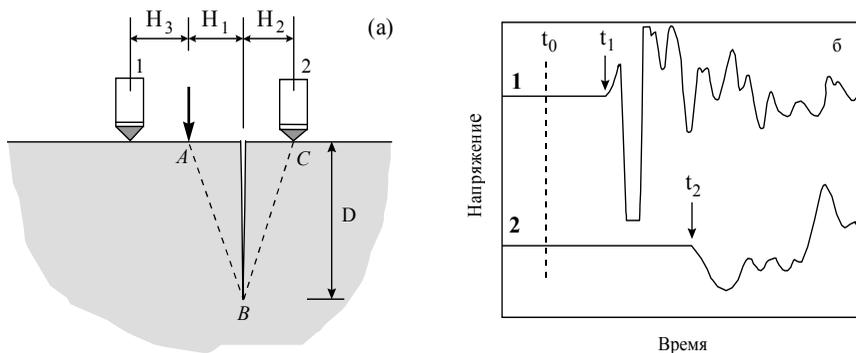


Рис. 7.10. Оценка глубины поверхностных трещин ИЕ-методом

На рис. 7.11 показана схема трансформации фронтов волны в зоне трещины. Фронт волны, инициированный ударом p , отражается от плоскости трещины p_c и переизлучается $p_{дp}$ от ее вершины.

⁵⁷ Такой режим измерения можно рассматривать как реализацию метода прохождения акустической волны.

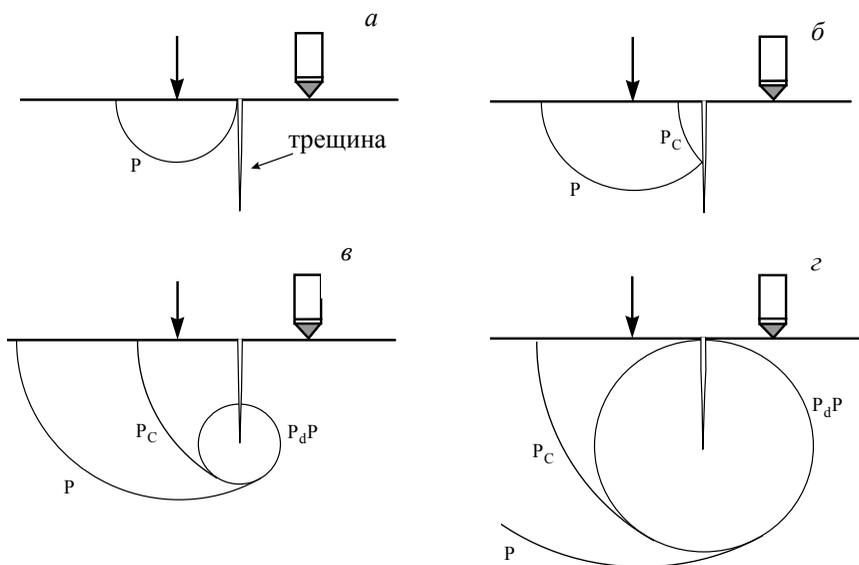


Рис. 7.11. Схема дифракции волны в зоне раскрытия трещины

С помощью ИЕМ возможно определение прочности бетона. Косвенным параметром является скорость прохождения импульса, а прочность определяют по градуировочным зависимостям, аналогичным зависимостям ультразвукового импульсного метода.

В сравнении с ультразвуковым импульсным методом прохождения, который при одностороннем доступе к бетонному изделию позволяет обнаружить лишь поверхностные и подповерхностные пустоты и трещины, ИЕМ обладает бесспорными преимуществами, надежно обнаруживая и скрытые дефекты. В оценке прочности и параметров упругости бетона оба метода дают близкие оценки. Различия обусловлены двумя основными факторами: слабо выраженной направленностью акустической волны ИЕМ и относительно низкой частотой возбуждаемых колебаний. Низкая частота волнового процесса приводит к увеличению глубины его локализации и, соответственно, эффективной глубины контроля бетона, что может рассматриваться как достоинство. С другой стороны, низкая частота и практически полное отсутствие направленности создает определенные трудности в селекции волновых составляющих, а значит и в оценке скорости их распространения, и связанных с ней физико-механических параметров

бетона. Кроме того, длинноволновый акустический сигнал IE-метода в меньшей степени подвержен частотной дисперсии скорости распространения из-за структурной неоднородности бетона.

ИЕМ успешно конкурирует с методом ультразвуковой дефектоскопии бетона, позволяя выявлять дефекты, скрытые под поверхностью: трещины, зоны недоуплотнения, расслоения бетона. Несмотря на то, что разрешающая способность ИЕМ, его возможности пространственной локализации одиночных дефектов и максимальная глубина «зондирования» заметно хуже, высокая чувствительность к приповерхностным дефектам, а также к скрытым протяженным дефектам структуры бетона, в наибольшей степени влияющим на несущую способность конструкции, открывает этому методу широкую перспективу практического использования.

Виброакустический метод

Аналогом IE-метода, получившим распространение в странах СНГ, является виброакустический метод, которым по своей физической основе является и сам ИЕМ. Приборы диагностики свай «Спектр-1/2/3» являются упрощенными версиями приборов IE-метода. Упрощение определяется меньшим измерительным диапазоном, максимальная частота рабочего спектра прибора «Спектр-3.0» – 23 кГц. Поэтому основное использование приборов этого типа – контроль дефектности протяженных изделий: свай, колонн и других, для контроля которых эффективны низкочастотные зондирующие сигналы (рис. 7.12). Как и для ИЕМ, виброакустический метод использует как временное, так и частотно-спектральное отображение принимаемого акустического сигнала.

Если для спектрального IE-метода при контроле массивных изделий важное значение имело соотношение размера дефекта и расстояние от него до поверхности изделия (см. рис. 7.9), то при контроле свай и других, подобных по геометрии, изделий, имеет значение соотношение между размером дефекта и размерами сечения сваи. Свая является своеобразным волноводом для акустического импульса, концентрируя его энергию в пределах сечения. Поэтому локальное изменение сечения сваи изменяет волновое акустическое сопротивление волновода в этой зоне, что создает эффект отражения для проходящей волны, часть энергии которой отражается в сторону излу-

теля. При малом затухании процесс отражения упругой волны от дефекта и оголовка сваи может повторяться многократно, формируя стоячую продольную волну, частота которой, как и для ИЕ-метода, будет определяться соотношением скорости звука в бетоне ($\sim 3500\text{--}4000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) и расстояния от головы сваи до дефекта по формуле (7.7).

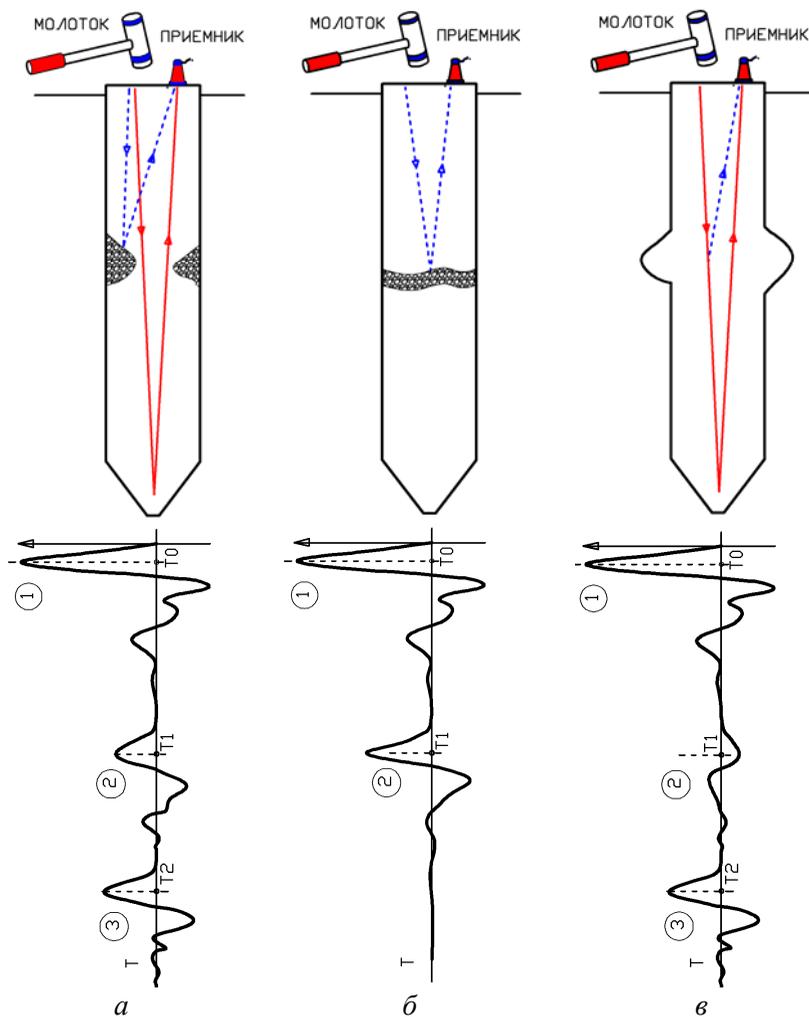


Рис. 7.12. Акустические отклики при различных типах дефектов свай

При большой длине сваи гармоническая стоячая волна в ней может не сформироваться, в этом случае более эффективным может оказаться анализ временного представления отраженного сигнала. Фаза (полярность) принятого отраженного импульса – в момент времени T_1 (см. рис. 7.12, *а* и 7.12, *в*) – будет зависеть от характера дефекта.

При наличии трещины или резкого локального сужения (см. рис. 7.12, *а* и 7.12, *б*) фаза отраженного от дефекта импульса – момент времени T_1 – будет совпадать с фазой импульса, отраженного от конца сваи, – момент времени T_2 . Фаза отраженного импульса от участка сваи с выраженным увеличением сечения будет противоположной.

Возбуждение колебаний производится специальным молотком (рис. 7.13) со встроенным датчиком силы.



Рис. 7.13. Комплект Impulse Response системы

Это позволяет синхронизировать отсчет времени принимаемого сигнала с моментом ударного возбуждения зондирующего импульса и, кроме того, нормировать величину сигнала на приеме, привязав ее к амплитуде импульса возбуждения. Такой же метод контроля, только иногда под другим названием (Sonic Echo (SE), Impulse Response (IR)), используется в западных аналогах (или прототипах) приборов серии «Спектр». В приборах виброакустического метода контроля, как и в приборах ИЕМ, отображение акустического отклика и его анализ может выполняться и в частотном и во временном представлении. На рис. 7.14 приведена временная диаграмма сигнала⁵⁸.

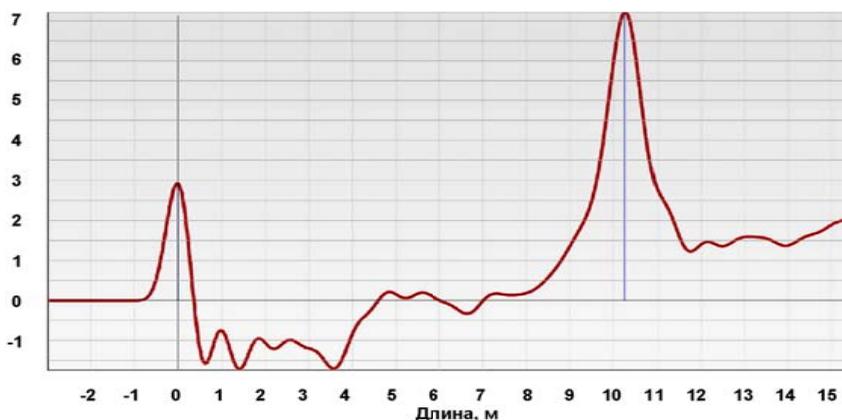


Рис. 7.14. Типичное временное отображение зондирующего и отраженного импульсов прибора «Спектр-3»

ИЕМ и вибрационно-акустический метод эффективны при контроле таких конструкций или элементов конструкций, у которых один

⁵⁸ Отраженный импульс (рис. 7.14) показан так, как будто его амплитуда больше амплитуды инициирующего импульса. Это связано с тем, что в приборах этого метода коэффициент усиления принятого сигнала автоматически увеличивается во времени: сигнал, пришедший позже, будет усилен сильнее, чем пришедший раньше. Реальная амплитуда отраженных импульсов всегда на несколько порядков меньше амплитуды инициирующего импульса.

габарит значительно (в 5 и более раз) больше или меньше остальных. При контроле компактных конструкций, у которых два или все габариты одного порядка, акустическое поле становится многочастотным. При этом соотношение частотных составляющих будет зависеть не только от геометрии конструкции, но и от координат положения приемного сенсора и точки возбуждения колебаний. Данное обстоятельство значительно затрудняет контроль таких изделий по типовым методикам, делая его в ряде случаев невозможным.

В этой связи перспективным выглядит многоканальный мультипликативный метод [19]. Указанный метод позволяет значительно упростить анализ частотного спектра контролируемой бетонной и железобетонной конструкции, снизив до минимума количество характеристических частот. Кроме того, этот метод позволяет, в сравнении с другими методами, получить более точную оценку скорости распространения акустического импульса в массиве бетона. Достоинством этого метода, как и ИЕМ, является возможность проводить контроль строительных конструкций из бетона толщиной до нескольких метров.

Этот метод предполагает использование одновременно нескольких приемных преобразователей либо последовательную установку одного преобразователя в N различных точках на поверхности объекта контроля. Резонансные характеристики, полученные в результате многоканального контроля, подвергаются мультипликативной обработке – перемножению. Так как положение пика, соответствующего частоте первой моды продольной волны на всех характеристиках остается неизменным, а амплитуды и местоположение других пиков меняются в зависимости от положения пары излучатель–приемник, то перемножение N спектральных характеристик приводит к статистическому выделению пика первой моды продольной волны и подавлению прочих пиков. На рис. 7.15 показан пример контроля бетонного компактного блока размером $80 \times 50 \times 30$ см [19]. Для четырех положений приемных преобразователей, расположенных в различных точках поверхности блока, зарегистрированы четыре резонансные характеристики. Как видно, однозначная интерпретация спектра в случаях b и $г$ затруднительна. Вид спектров не позволяет визуально определить характеристические резонансные частоты. На рис. 7.15, $д$ приведен результат перемножения этих характеристик, представляющий собой выраженный резонансный пик,

обеспечивающий однозначную интерпретацию оценки толщины контролируемого изделия и скорости акустической волны.

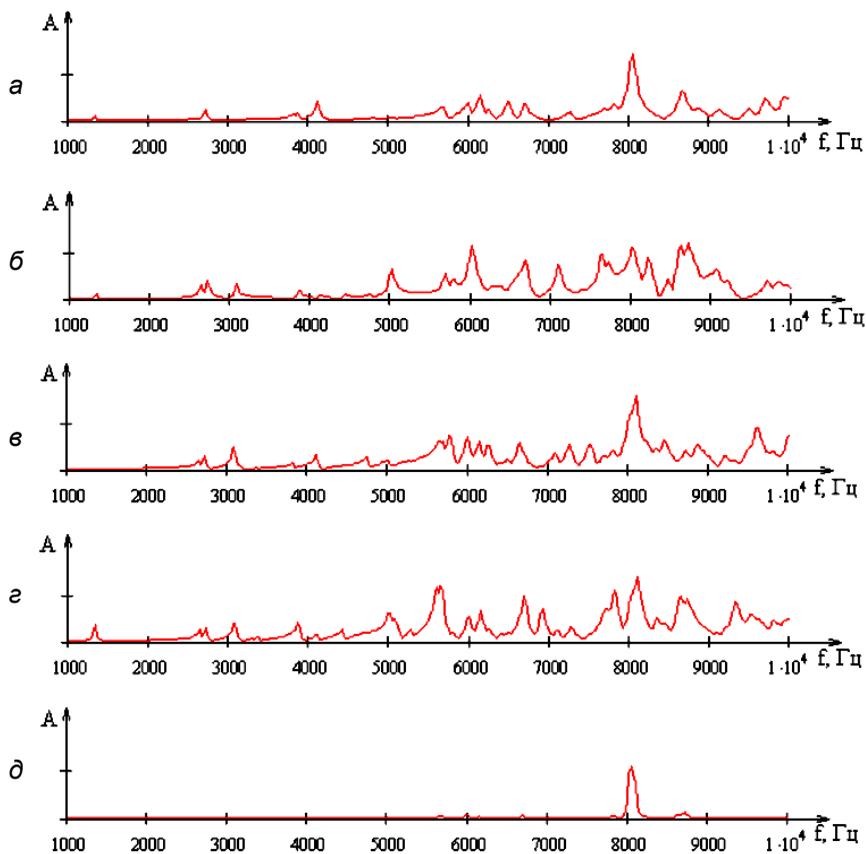


Рис. 7.15. Частотные спектры бетонного блока $80 \times 50 \times 30$ см для четырех позиций установки излучателя и результат обработки по алгоритму РММ [19]

7.2. Ультразвуковой импульсный метод контроля бетона

Ультразвуковой импульсный (УЗИ) метод является активным методом прохождения, который реализуется системой из излучающего и приемного акустических преобразователей и блока измерения времени между моментом излучения и моментом приема

акустического импульса. В странах СНГ метод УЗИ нормируется ГОСТ 17624⁵⁹ [13], в соответствии с которым в качестве косвенного параметра рассматривается скорость (время) распространения импульса зондирующей волны, имеющая взаимосвязь с физико-механическими свойствами бетона. Прочность бетона f_c определяют с использованием градуировочной зависимости, связывающей косвенный параметр метода с показателем прочности.

Выше указывалось, что параметры акустических методов не имеют прямой физической зависимости от показателей прочности бетона, а определяются главным образом его упругими свойствами. Поэтому при определении прочности бетона ультразвуковым методом можно ожидать такой степени надежности оценки, с какой известна эмпирическая связь прочности бетона и его упругости:

$$E_{cm} = 9,5(f_{ck,cyl} + 8)^{1/3} \cdot 10^3, \text{ МПа}, \quad (7.10)$$

где E_{cm} – модуль упругости;

$f_{ck,cyl}$ – характеристическая прочность тяжелого и мелкозернистого бетона⁶⁰.

Однако практика ультразвукового контроля показывает, что корреляция скорости продольной волны и прочности зачастую имеет более устойчивый характер, чем для упругих модулей и прочности (7.10). Объяснить механизм этого явления можно одновременным сильным влиянием на прочность и на скорость распространения ультразвукового импульса дефектов структуры бетона. Разрушение бетонного образца при сжатии начинается с развития микро- и макродефектов. В то же время дефекты структуры – микро-, макротрещины и поры – сильно влияют на характер передачи упругого импульса, что выражается в вариации его скорости распространения.

На рис. 7.16 показана упрощенная модель прохождения упругой волны через неоднородную структуру бетона. В пористой структуре

⁵⁹ В Республике Беларусь с 2014 г. действует стандарт СТБ EN 12504-4–2014 «Методы контроля бетона в конструкциях. Часть 4. Определение скорости распространения ультразвукового импульса».

⁶⁰ Известны другие варианты записи этой взаимосвязи, в частности, в EN 1992-1 приведена следующая формула: $E_{cm} = 22000(f_{cm}/10)^{0,3}$, МПа.

бетона с малым количеством механических связей между компонентами траектории передачи импульса представляют собой множество сильно изломанных линий, в самой короткой из которых вектор передачи импульса также многократно изменяет направление.

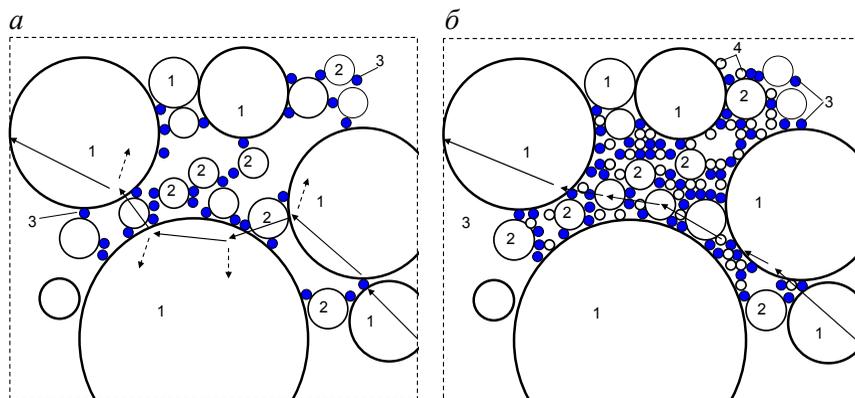


Рис. 7.16. Упрощенная модель прохождения УЗ-импульса через структуру бетона:
a – бетон низкой прочности; *б* – бетон высокой прочности;
 1 – зерна крупного заполнителя; 2 – зерна мелкого заполнителя;
 3 – кристаллы цементного камня; 4 – зерна микрокремнезема

Каждая смена направления передачи импульса (по закону сохранения импульса движения) приводит к разделению его на векторные составляющие, что выражается в рассеивании и затухании акустического сигнала. Плотность и модуль упругости зерен крупного заполнителя заметно выше этих показателей для песчано-цементной матрицы, в терминах акустики это выражается в несогласованности их акустических импедансов. Следствие этого – дополнительное затухание из-за отражений на границах зерен заполнителей. В более плотном бетоне (см. рис. 7.16), с бóльшим количеством кристаллизационных связей, траектории передачи энергии акустического импульса изломаны в меньшей степени, плотность и модуль упругости песчано-цементной матрицы выше. Это проявляет себя в меньшем затухании акустического импульса, большей скорости его распространения, несмотря на увеличение плотности среды.

Отмеченные факты указывают на высокую чувствительность ультразвукового метода к структурной неоднородности бетона. Но

при этом показатели неоднородности (процентное содержание крупного заполнителя, разница модулей упругости и плотности компонентов, пористость бетона и др.) имеют разный характер влияния на прочность бетона при одноосном сжатии и на скорость распространения ультразвукового импульса. Это делает оценку прочности бетона по скорости ультразвука неоднозначной. Например, увеличение модуля упругости крупного заполнителя приведет к увеличению скорости распространения ультразвукового импульса, но может привести к снижению показателя прочности бетона из-за больших внутренних напряжений на границе крупный заполнитель – цементная матрица при испытании образца на сжатие.

На рис. 7.17 приведены графики градуировочных зависимостей для бетонов разных составов и разных сроков твердения.

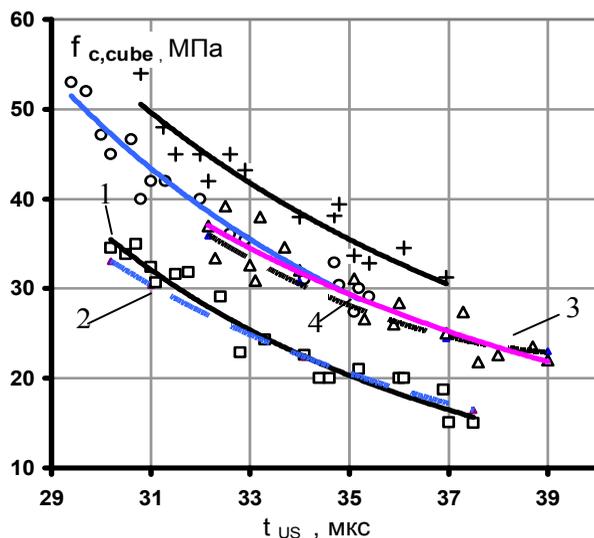


Рис. 7.17. Данные испытаний бетонных образцов составов № 1 и 2 (прил А, табл. А1) и соответствующие градуировочные зависимости:

- + – состав № 1, возраст бетона 14 сут; o – состав № 2, возраст бетона 14 сут;
- Δ, □ – соответственно составы № 1 и 2, возраст бетона 2 сут

Без учета возраста твердения бетона различие в оценках его прочности стандартным ультразвуковым методом может достигать 30–50 %.

Основным способом контроля по ГОСТ 17624 [13] является сквозное прозвучивание (рис. 7.18). Излучающий и приемный электроакустические преобразователи (ЭАП) устанавливают с противоположных сторон образца или конструкции или на смежных гранях в соответствии с рис. 7.18. Скорость ультразвукового импульса определяется соотношением

$$v = L/t, \quad (7.11)$$

где L – расстояние между излучающим и приемным ЭАП;

t – интервал времени между моментами излучения и приема ультразвукового импульса.

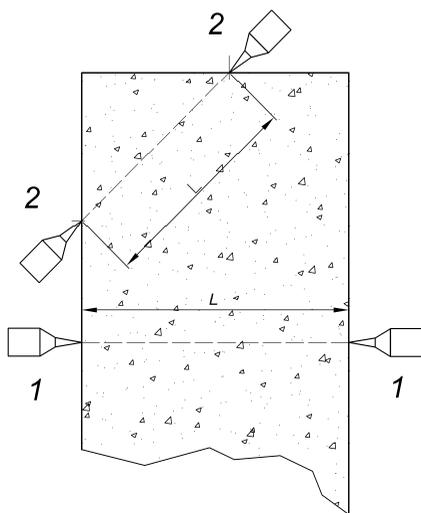


Рис. 7.18. Схема испытания бетона способом сквозного прозвучивания

Особый интерес для практики контроля монолитного бетона, в том числе и на ранней стадии его твердения, представляет поверхностное прозвучивание (рис. 7.19), что обусловлено ограниченными возможностями доступа к изделию, находящемуся в опалубке, и значительными габаритами монолитных конструкций, затрудняющими соосную установку преобразователей на противоположных гранях изделия и определение базы прозвучивания с необходимой точностью.

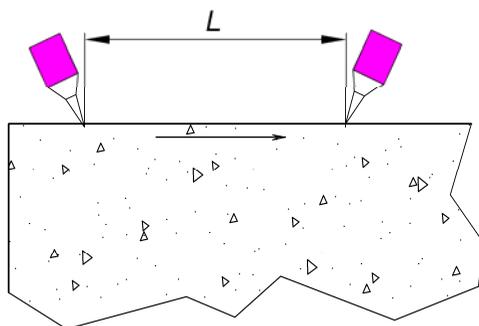


Рис. 7.19. Схема испытания бетона способом поверхностного прозвучивания:
 L – база прозвучивания

В ряде случаев, в частности для оценки неоднородности бетонного массива по физико-механическим свойствам, эффективной может оказаться реализация сквозного и поверхностного прозвучивания на основе метода профилирования.

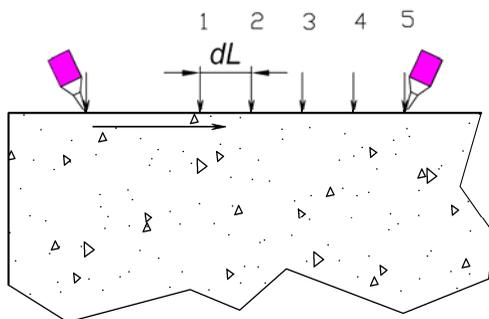


Рис. 7.20. Схема поверхностного прозвучивания бетона методом профилирования

В качестве информативного параметра используется *дифференциальная скорость* распространения ультразвукового импульса V_d , которая рассчитывается как среднее арифметическое единичных значений скорости для каждого шага профилирования dL_i , которые рассчитываются по формуле

$$V_{di} = \frac{dL_i}{dt_i} \cdot 10^3, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (7.12)$$

где dt_i – приращение времени распространения ультразвука для i -го шага профилирования, мкс.

Необходимость «привязки» ультразвукового метода испытаний к составу бетона и технологии производства бетонных работ можно рассматривать как его главный недостаток⁶¹.

Сильными сторонами ультразвукового импульсного метода является его высокая чувствительность к изменениям структуры бетона, а также, в отличие от склерометрических методов испытаний, высокая «проникающая способность» в массив бетона и малая чувствительность к качеству поверхности контролируемого изделия. С таких позиций УЗИ-метод можно рекомендовать как эффективный экспресс-метод для выявления участков железобетонной конструкции, вызывающих сомнения в качестве бетона. Уточненная оценка прочности бетона может быть выполнена с дополнительным привлечением механических методов испытаний.

Ультразвуковой импульсный метод: техническая реализация

Формирование зондирующего акустического (ультразвукового) сигнала в бетонном массиве конструкции всеми существующими в настоящее время приборами контроля производится исключительно способом механического импульсного или квазигармонического воздействия на поверхность контролируемого массива. Это достигается либо механическими колебаниями контактирующего с поверхностью бетона протектора магнитострикционных и пьезоэлектрических преобразователей, либо импульсным локальным нагревом поверхности бетона, например, импульсным лазерным излучением или искровым электрическим разрядом. Выбор основной частоты колебаний заполнения зондирующего импульса ограничен сверху структурной неоднородностью бетона: длина волны колебаний λ не должна быть меньше размеров зерен крупного заполнителя. Для среднего размера зерна щебеночного заполнителя 1,5–2 см, типовой

⁶¹ В соответствии с пунктом 6.18 СТБ 2264–2012 [34] применение ультразвукового метода оценки прочности по ГОСТ 17624 при обследовании зданий и сооружений и текущем контроле прочности допускается только в сочетании с другим методом неразрушающего контроля или при условии сравнения с результатами испытаний выбуренных кернов.

скорости v_{us} распространения акустической волны в бетоне ($4000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) верхнюю граничную частоту можем рассчитать из соотношения

$$f_{US, \max} = \frac{v_{US}}{\lambda} = \frac{4000}{0.02} = 80 \cdot 10^3, \text{ Гц.}$$

При большей частоте резко увеличивается затухание волны.

Для определения нижней границы частоты нет четких критериев. С одной стороны, понижение частоты снижает затухание, что позволяет увеличить базу прозвучивания бетона. С другой, понижение частоты уменьшает чувствительность метода к структурной неоднородности и дефектности бетона. Важным моментом является метрологическая сторона измерений – обеспечение требований точности регистрации момента появления акустического сигнала. При регистрации времени распространения по первому фронту акустического сигнала, погрешность в определении времени будет зависеть от соотношения сигнал/шум и крутизны фронта сигнала (рис. 7.21).

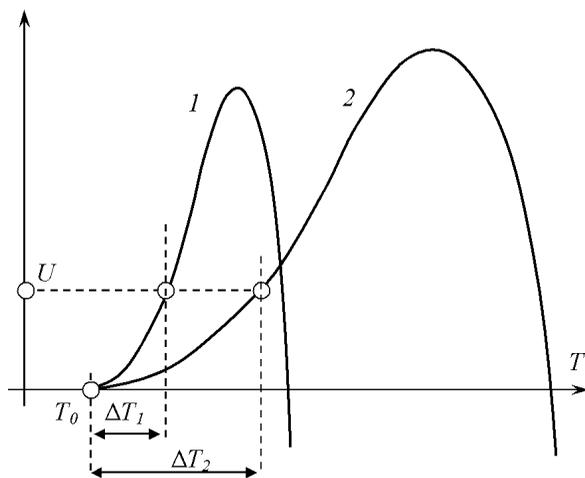


Рис. 7.21. Погрешность измерения времени распространения акустического импульса: 1, 2 – временные диаграммы высокочастотного и низкочастотного УЗ-импульсов; U – уровень регистрации импульса; T_0 – «истинный» момент появления УЗ-импульса; $\Delta T_1, \Delta T_2$ – погрешности регистрации времени распространения

Суммарные потери мощности акустического импульса в бетоне и особенно в точках контакта ЭАП с бетоном приводят к тому, что

амплитуда первого вступления принятого импульса снижается до величины, соизмеримой с шумами приемного тракта прибора.

Исходя из требований ГОСТ 17624 к погрешности δ определения скорости (времени распространения) не более 1 %, можно ориентировочно определить нижнюю границу частоты, приняв отношение сигнал/шум (с/ш) 10:1, базу измерения – 20 см, скорость акустической волны в бетоне – $4000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Для указанных параметров допустимая абсолютная погрешность определения времени распространения составит $\sim 0,5$ мкс, а максимальная длительность фронта сигнала $\tau_{\phi} = 0,5 \cdot \text{с/ш} = 5$ мкс. Длительность фронта приблизительно равна четверти периода колебаний. Таким образом, нижняя граница частоты зондирующих колебаний составит

$$f_{US,\min} = \frac{1}{T_{US}} = \frac{1}{20 \cdot 10^{-3}} = 50 \cdot 10^3, \text{ Гц.}$$

Обычное значение рабочей частоты для большинства приборов ультразвукового контроля бетона лежит в пределах от 50 до 200 кГц. Самое распространенное значение – приборы УК1401 и приборы серии «Пульсар» (рис. 7.22) – 54–60 кГц.



Рис. 7.22. Ультразвуковые приборы контроля бетона:
 а, б – приборы серии «Пульсар»; в – УК1401

В современных приборах для ультразвуковых испытаний бетона используются ЭАП с активным элементом из пьезокерамики (рис. 7.23).

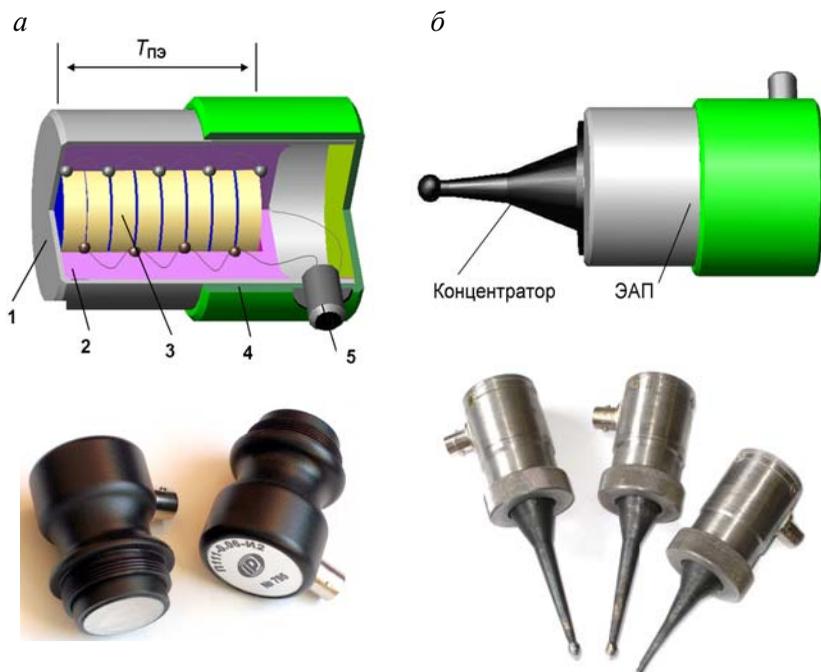


Рис. 7.23. Электроакустические преобразователи:
a – конструкция ЭАП; *б* – ЭАП с акустическим концентратором;
 1 – рабочий торец (протектор) ЭАП;
 2 – защитный демпфирующий компаунд; 3 – пьезоэлементы;
 4 – корпус ЭАП; 5 – разъем подключения электрического кабеля

Она позволяет эффективно преобразовать акустический импульс в электрический сигнал и наоборот – электрический импульс в акустический. К основному эксплуатационному недостатку можно отнести ее невысокую стойкость к ударам, которые неизбежно возникают при пользовании приборами в натуральных производственных условиях.

В качестве активного элемента такого типа ЭАП используется пакет пьезокерамических дисков, поляризованных по толщине. Акус-

тически диски включены последовательно – толщина пакета выби-
рается равной $\lambda_0/2$, электрически – параллельно. Зондирующий аку-
стический импульс формируется обычно «ударным» возбуждением
активного элемента ЭАП. К пьезоэлементам подводится перепад
(скачок) электрического напряжения порядка 400–800 В, что приво-
дит к возникновению в них внутреннего механического напряже-
ния. Скачкообразное механическое напряжение пьезоэлемента при-
водит к его деформации, которая, распространяясь и отражаясь от
торцов пьезоэлемента, создает в нем затухающие волны. Основная
частота волн соответствует полуволновой толщине $T_{пз}$ пьезоэле-
мента и может быть рассчитана по формуле (7.6)⁶². Таким образом,
частота формируемых ЭАП ультразвуковых колебаний определяется
размерами активного элемента и его физико-механическими ха-
рактеристиками и практически не зависит от параметров возбужда-
ющего сигнала.

В практике натуральных испытаний получили распространение
ЭАП с «сухим» точечным контактом (СТК). ЭАП такого типа (см.
рис. 7.23, б) представляет собой сборную конструкцию, состоящую
из типового низкочастотного ЭАП с плоской протекторной зоной,
к которой через слой контактной смазки прижимается торцевой
частью концентратор. Концентратор «фокусирует» акустическое дав-
ление, распределенное по рабочей плоскости преобразователя в то-
чечную зону контакта. Механизм «концентрации» колебаний обус-
ловлен законом сохранения импульса

$$M_\lambda v = m_\lambda V, \quad (7.13)$$

где M_λ – масса приведенного к длине волны участка концентратора
связанного с пьезоэлементом;

m_λ – масса приведенного к длине волны рабочего участка кон-
центратора;

v и V – соответствующие колебательные скорости.

⁶² При сильной механической связи ЭАП с контролируемым объектом
характер стоячей волны в пьезоэлементе изменяется, частота колебаний
снижается. При сильной механической связи частота снижается почти
в 2 раза, приближаясь к четвертьволновой; это следует принимать во вни-
мание, используя ЭАП с вязким акустическим контактом.

Направленность излучаемого акустического импульса α зависит от отношения длины волны колебаний λ к диаметру контактной зоны D (рис. 7.24, *а*)

$$\alpha \approx 2 \arcsin \left(1,22 \frac{\lambda}{D} \right), \text{ радиан.} \quad (7.14)$$

Для СТК диаграмма направленности представляет собой сферу. При изменении ориентации оси концентратора ЭАП по отношению к плоскости поверхности контроля (рис. 7.24, *б*) диаграмма также несколько поворачивается, изменяя направленность и поляризацию излучаемых колебаний.

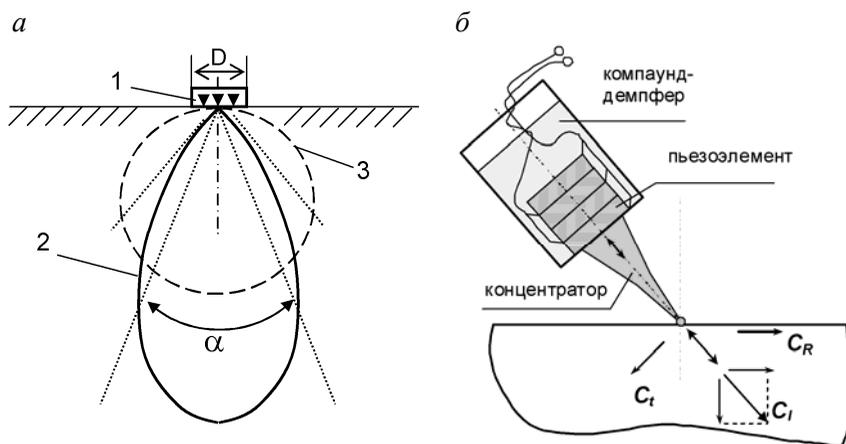


Рис. 7.24. Направленность излучения-приема ультразвука:
а – диаграммы направленности излучателей УЗК;
б – поляризация волн для ЭАП с акустическим концентратором;
1 – излучатель диаметром D ; *2* – диаграмма направленности (α – раскрыв диаграммы направленности излучателя (приемника), рад);
 D – диаметр излучающей зоны, λ – длина волны);
3 – диаграмма направленности точечного излучателя

При поверхностном контроле бетона обычно используется продольная подповерхностная волна. Для ее создания (и приема) ЭАП устанавливаются наклонно к поверхности. В этом случае подповерхностная продольная волна инициируется горизонтальной составляющей вектора c_l (см. рис. 7.24, *б*).

Кроме продольной подповерхностной волны, в зоне контакта ЭАП с поверхностью формируются волны других типов: волна Релея, распространяющаяся в приповерхностной области со скоростью c_R , и объемная поперечная волна (см. рис. 7.1). Образующаяся объемная поперечная волна имеет максимум интенсивности в направлении $35\text{--}75^\circ$ от нормали к поверхности. Поперечная волна может быть зафиксирована при поверхностном контроле, это так называемая *SH*-волна. Интенсивность указанных волн также зависит от ориентации оси ЭАП.

На рис. 7.25 показана конструкция ЭАП, используемого преимущественно для инициации поперечных ультразвуковых волн. Активный элемент ЭАП представляет собой двухслойный пьезоэлемент, слои которого возбуждаются в противофазе.

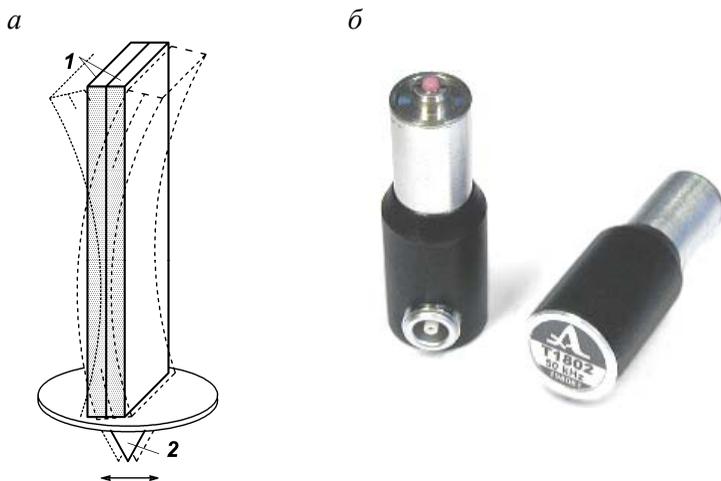


Рис. 7.25. ЭАП по схеме II:
 а – конструктивная схема; б – образцы ЭАП

В результате в каждом из слоев возникают механические напряжения противоположных знаков, что приводит к изгибной деформации всего пьезоэлемента и смещению протекторного наконечника в направлении, перпендикулярном плоскости пьезоэлемента. ЭАП этого типа создает тангенциальные колебания точки контакта с бетоном и эффективен для создания поперечных волн и продольных

подповерхностных. ЭАП такого типа используется в ряде приборов, в частности в УК1401 и низкочастотных дефектоскопах А1201 и А1040. Изгибные колебания пьезоэлемента эффективно демпфируются компаундом, что дает возможность генерации коротких по длительности зондирующих импульсов, необходимых для ультразвуковой дефектоскопии бетона.

7.3. Ультразвуковая дефектоскопия железобетонных конструкций

Прочностные показатели любой конструкции в целом, в том числе и железобетонной, определяются не только упруго-прочностными показателями использованных конструкционных материалов, но и присутствием внутренних дефектов: пустот, трещин, включений инородных фрагментов, областей повышенной пористости, расслоения, недоуплотнения и др. Выявление такого рода дефектов конструкций является сферой применения методов дефектоскопии.

Как уже упоминалось выше, многие крупные дефекты железобетонных конструкций могут выявляться методами свободных колебаний. Конкуренцию этим методам, благодаря своей высокой эффективности обнаружения и локализации небольших дефектов сплошности бетона, составляет метод ультразвуковой дефектоскопии. Если в области ультразвуковой дефектоскопии однородных, мелкозернистых материалов, в первую очередь, металлов, накоплен огромный опыт, создан широкий спектр высокоэффективных приборных средств, разработаны и стандартизированы методики контроля, то применительно к бетону этого сказать нельзя. Сложность выявления дефектов в бетоне связана в основном с его неоднородностью – наличием крупного заполнителя, размер зерен которого накладывает ограничение на минимальную длину волны зондирующих колебаний. С длиной волны λ , в свою очередь, связан размер выявляемого дефекта, а также степень направленности «луча» зондирующих колебаний (см. рис. 7.24). Указанные ограничения не позволяют уменьшить длину волны ниже 4–3 см, что соответствует частотам 70–100 кГц.

Работы в области совершенствования ультразвуковых приборных средств *дефектоскопии* бетона привели к появлению сравнительно нового класса приборов – низкочастотных ультразвуковых дефекто-

скопов-томографов. Они позволяют производить локализацию и оценку размеров дефектов в крупноструктурных материалах, в том числе и в бетоне, при одностороннем доступе к изделию, используя отраженный от дефекта сигнал, обеспечивая 3D-визуализацию дефектов на встроенном дисплее. Основой измерительного тракта является акустическая антенная решетка, представляющая собой матрицу низкочастотных широкополосных ультразвуковых преобразователей с низким уровнем реверберации. Отдельный преобразователь практически не обладает направленными свойствами (см. рис. 7.24, а), но объединение преобразователей в плоскую матрицу – расстояние между отдельными ЭАП составляет 0,5–1 длины волны в бетоне – и особый режим их возбуждения позволяет управлять направленностью и фокусировкой зондирующего ультразвукового «луча».

Изменение направления зондирующего «луча», его фокусировка в заданную область пространства контроля осуществляется «электронным» способом на основе метода синтезированной апертуры, фокусируемой в произвольную точку полупространства (*SAFT – Synthetic aperture focusing technique*)⁶³. Суть метода заключается в возбуждении каждого отдельного ЭАП в матрице индивидуальным сигналом, имеющим определенный временной (фазовый) сдвиг относительно сигнала соседнего ЭАП. Это позволяет, при выборе соответствующих временных сдвигов для излучаемых сигналов, осуществить сложение энергии импульсов от каждого ЭАП в локальной области контролируемого пространства, размер области фокусировки примерно равен длине волны колебаний. При этом колебания в остальных областях взаимно ослабляются.

На основе акустической антенной решетки преобразователей с СТК и метода SAFT созданы низкочастотные дефектоскопы-томографы А1220 и А1040-Mira. Конструктивно дефектоскоп А1220 МОНОЛИТ (рис. 7.26) состоит из электронного блока с экраном и клавиатурой, а также 24-элементного (6×4) матричного антенного устройства (АУ). Элементы АУ подпружинены и дают возможность измерения на криволинейных и шероховатых поверхностях бетонных конструкций эхо-методом. Разрешающая способность

⁶³ Указанный принцип широко используется в радиолокации. Использование матричных антенн позволяет сканировать пространство с большой скоростью без механического поворота самой антенны.

дефектоскопа – томографа А1220 – составляет приблизительно 60–80 мм по обеим осям координат.



Рис. 7.26. Низкочастотный дефектоскоп А1220-МОНОЛИТ
(<http://www.acsys.ru>)

Его чувствительность достаточна для обнаружения в мелкозернистом бетоне полостей с размерами от 30 мм и более. При размерах крупного заполнителя более 20–30 мм томограф позволяет обнаружить полости, превышающие средний размер зерна в 1,5–2 раза.

Более широкими возможностями обладает дефектоскоп-томограф А1040-Miga. Кроме применения антенной матрицы большего размера (12 × 4), что улучшает пространственное разрешение дефектов, в приборе значительно усовершенствован алгоритм обработки отраженных сигналов. Прибор позволяет менять пространственное расположение плоскости фокусирования зондирующего ультразвукового сигнала и получать так называемые *B*-, *C*- и *D*-сканы (рис. 7.27) присутствующих в контролируемом массиве дефектов.

Меняя позиции установки прибора на поверхности контролируемой конструкции с шагом около 0,5 метра, можно получить набор сканов, которые программно объединяются. Результат объединения может быть использован для пространственной визуализации имеющихся дефектов (рис. 7.28).

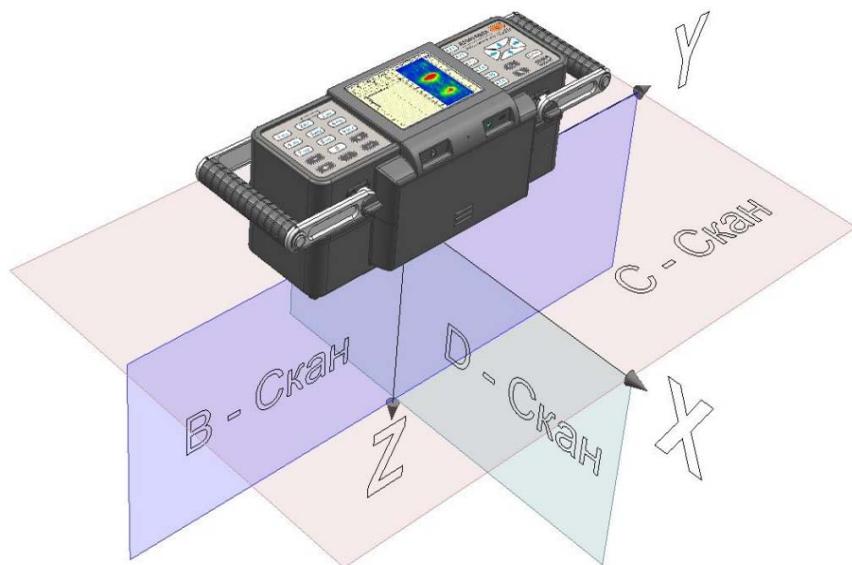


Рис. 7.27. Низкочастотный дефектоскоп-томограф А1040-Мира
(<http://www.acsys.ru>)

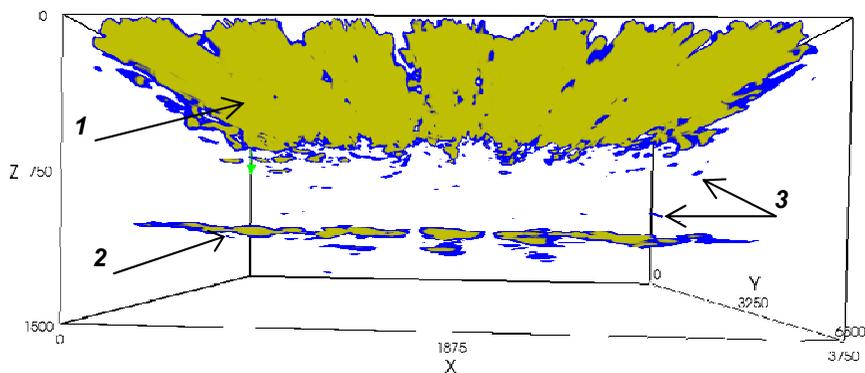


Рис. 7.28. 3D-визуализация акустических неоднородностей фрагмента 6×5 м монолитной фундаментной плиты толщиной 1,2 м по данным испытаний низкочастотным дефектоскопом-томографом А1040-Мира:
1 – отображение верхней сетки армирования; 2 – отражение от дна плиты;
3 – одиночные мелкие пустоты в массиве

7.4. Радиоволновая дефектоскопия

Для локализации и оценки размеров неоднородностей и структурных нарушений в бетоне представляет интерес использование методов радиолокации. Выбор длины волны зондирующих электромагнитных волн связан с теми же ограничениями, что и для ультразвука. Но учитывая, что скорость электромагнитных волн в бетоне лишь в 2–3 раза ниже скорости света, используемый частотный диапазон смещается в область 10^9 – 10^{10} Гц, а измеряемые интервалы времени – в область 10^{-9} – 10^{-10} с.

Импульс, излучаемый в исследуемую среду, отражается от неоднородностей, имеющих отличную от среды диэлектрическую проницаемость или проводимость, принимается приемной антенной, усиливается в широкополосном усилителе. После преобразования в цифровую форму информация поступает на портативный компьютер для дальнейшей обработки и регистрации.

Основными достоинствами метода радиолокации, в сравнении с акустическими методами, являются возможность бесконтактного (на расстоянии) взаимодействия приемно-излучающей системы с контролируемым изделием, возможность плавной/ступенчатой перестройки частоты зондирующих колебаний в достаточно широком диапазоне, что повышает информативность контроля. Бесконтактный ввод-прием сигнала упрощает процесс сканирования контролируемой поверхности и позволяет выполнять его с большой скоростью, что особенно важно при обследовании состояния дорожного и аэродромного покрытий.

Известны радиолокационные приборы подповерхностного зондирования (в общепринятой терминологии – георадары) серии «ОКО» (НИИ приборостроения и ООО «Логис» г. Жуковский, Россия) и радиолокаторы разработки ЦНИИРЭС (Россия) – «Раскан-3». Конструктивно приборный комплект включает в себя антенный блок (в комплект может входить несколько антенных блоков разных частотных диапазонов), стыкующийся с компьютером, выполняющим управление зондированием, обработку и 3D-визуализацию результатов санирования.

На рис. 7.29 показан антенный блок АБ-400 георадара «ОКО». Частотный диапазон антенного блока определяет разрешающую способность и максимальную глубину зондирования (табл. 7.1): более

высокой частоте соответствует лучшая разрешающая способность и меньшая, связанная с ростом затухания радиоволн, глубина зондирования.



Рис. 7.29. Антенный блок АБ-400 георадара «ОКО» при обследовании плит взлетно-посадочной полосы (<http://www.logsys.ru>)

Таблица 7.1

Характеристики антенных блоков георадара «ОКО»

Антенные блоки	Центральная частота антенных блоков, МГц	Максимальная глубина зондирования*, м	Разрешающая способность по глубине, м
АБД	25–100	30	0,5–2,0
АБ-150	150	12	0,35
АБ-250	250	8	0,25
АБ-400	400	5	0,15
АБ-500	500	4	0,12
АБ-700	700	3	0,1
АБ-1200	1200	1,5	0,05
АБ-1700	1700	1	0,03

* В условиях сухого песка.

На рис. 7.30 приведена радарограмма сканирования участка взлетно-посадочной полосы и ее расшифровка.

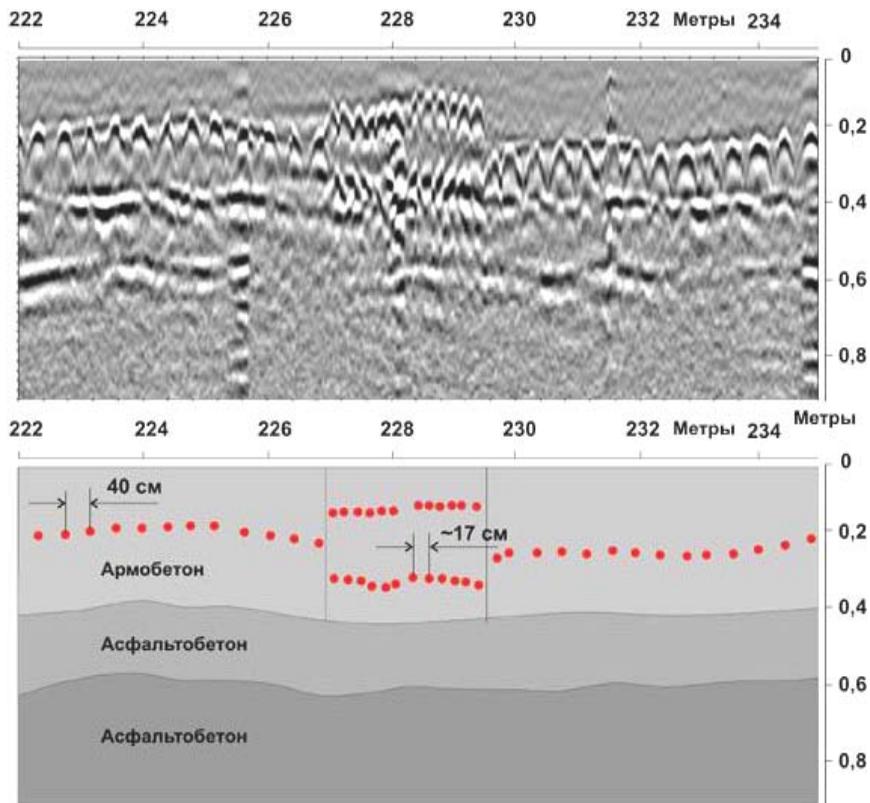


Рис. 7.30. Радарограмма георадара «ОКО» с антенным блоком АБ-1700 (вверху); расшифровка радарограммы (внизу)

Использование георадара «ОКО» для контроля монолитного бетона эффективно для крупноразмерных изделий. Лучшей разрешающей способностью обладает радиолокатор «Раскан» (табл. 7.2 и рис. 7.31).

Технические параметры радиолокатора «Раскан-2»

Вес прибора без учета веса ЭВМ, кг	3,5
Максимальная глубина зондирования, м	0,2
Разрешение в плоскости зондирования, см	2
Мощность генератора, мВт	10
Количество рабочих частот	5
Число поляризации принимаемого сигнала	2
Число одновременно получаемых радиоизображений	10
Производительность, м ² /час	2,5–4

В ЭВМ типа IBM PC информация вводится через специальный интерфейс в автоматическом режиме, через порт принтера. Прибор серии «РАСКАН» обеспечивает обнаружение протяженного объекта диаметром 0,05 мм и длиной 20 мм в толще бетона на глубине 50 мм, формируя подповерхностное изображение исследуемой области на экране монитора компьютера.



Рис. 7.31. Антенный блок (датчик) прибора «Раскан-3»
(по материалам сайта <http://www.rslab.ru>)

Для обнаружения дефектов в строительных конструкциях более важным параметром радара, чем максимальная глубина зондирования, становится минимальная глубина обнаружения дефекта. Снижение этой величины до значений 2...5 см представляет собой непро-

стью техническую задачу, так как электромагнитный импульс проходит это расстояние за время порядка $2-3 \cdot 10^{-10}$ секунды. Сегодня применяются два подхода в ее решении: на основе использования зондирующих электромагнитных импульсов малой длительности 0,1–1 нс (георадар «ОКО»), аналогично тому, как эта задача решается в акустических дефектоскопах, и использование непрерывных сверхвысокочастотных (СВЧ) колебаний с широкополосной перестройкой по частоте и регистрации разницы частот (частоты биений) излучаемого и отраженного от дефекта сигналов.

8. ПОСТРОЕНИЕ ГРАДУИРОВОЧНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ КОСВЕННЫХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ

В основе всех косвенных методов испытаний (измерений) лежит процедура функционального преобразования косвенных параметров метода в параметр, который подлежит оценке (рис. 8.1).

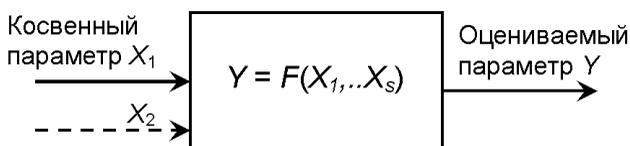


Рис. 8.1. Функциональное преобразование косвенных параметров

В практике испытаний функциональная связь косвенных параметров и оценочного параметра получила название градуировочной зависимости. В общем случае градуировочная зависимость может иметь несколько косвенных параметров (аргументов) X_1-X_s , но если принимать во внимание только методы испытаний, стандартизированные к настоящему времени, то, как правило, речь идет об одном косвенном параметре⁶⁴. Например, для метода упругого отскока косвенный параметр один – индекс отскока, для метода отрыва со скалыванием бетона – сила отрыва, для ультразвукового импульсного метода – скорость распространения акустического импульса в бетоне.

⁶⁴ Исключение могут составлять комбинированные методы испытаний, которые объединяют в себе несколько – обычно два – косвенных параметров.

Рассмотрим последовательность построения градуировочной зависимости для однопараметрового метода. Исходные данные для построения получают в результате совместных измерений пар значений косвенного параметра X , например, индекса отскока и оценочного параметра Y – «кубиковой» прочности бетона. Массив пар значений X и Y можно отобразить на плоскости X – Y в виде точек (рис. 8.2).

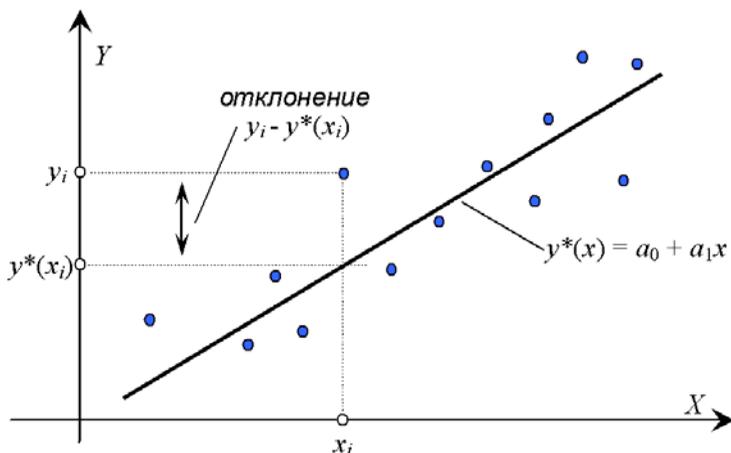


Рис. 8.2. Диаграмма рассеяния пар отсчетов и построенная линейная градуировочная зависимость для однопараметрового косвенного метода испытаний

Задача построения градуировочной зависимости заключается в подборе такой функции $y^* = F(x)$, которая «наилучшим образом» описывает зависимость Y от X . На первый взгляд, задача тривиальная, поскольку математический анализ позволяет решить такую задачу точно, взяв в качестве градуировочной зависимости степенной полином, максимальный показатель степени которого на единицу меньше, чем количество экспериментальных точек. Например, если точек две, то достаточно полинома степени 1, то есть прямой линии, которая пройдет через обе точки. Если точек пять, то задача будет решена полиномом степени 4. Но смысла в таком «точном» решении мало, поскольку очевидно, если повторить измерения пар значений X и Y , то новые точки окажутся в других местах плоскости, хотя положение всего «облака» возможных точек экспериментальных данных в целом остается неизменным.

Из этого следует вывод: градуировочная зависимость не должна «стремиться» соответствовать каждой точке массива экспериментальных данных. Она должна отражать то общее свойство, что присуще всем повторным выборкам экспериментальных данных.

Линейная градуировочная зависимость

Рассмотрим задачу «наилучшей» аппроксимации массива пар значений x_q и y_q , $q = 1, \dots, n$ линейной функцией

$$y^*(x) = a_0 + a_1x. \quad (8.1)$$

Решение задачи заключается в нахождении коэффициентов a_0 , a_1 , обеспечивающих наилучшее приближение $y^*(x_q)$ к y_q . Существуют разные критерии для оценки этого приближения. Классический подход к определению параметров линейной регрессии основан на методе наименьших квадратов (МНК)⁶⁵, в соответствии с которым критерием качества приближения является достижение минимума суммой квадратов отклонений значений аппроксимирующей функции $y^*(x_q)$ от измеренного значения y_q для значений аргумента x_q [25]. Записать его можно в виде

$$\sum_{q=1}^n [y_q - y^*(x_q)]^2 = \sum_{q=1}^n \varepsilon_q^2 \rightarrow \min.$$

Опуская промежуточные выкладки, приведем готовые выражения для a_0 и a_1 :

$$a_1 = \frac{\sum_{q=1}^n (x_q - x_{\text{cp}})(y_q - y_{\text{cp}})}{\sum_{q=1}^n (y_q - y_{\text{cp}})^2}; \quad (8.2)$$

$$a_0 = y_{\text{cp}} - a_1x_{\text{cp}}. \quad (8.3)$$

⁶⁵ Наряду с методом наименьших квадратов возможен и другой подход к определению параметров линейного регрессионного уравнения по данным эксперимента – метод максимального правдоподобия.

Уравнение регрессии (8.1) всегда дополняется показателем тесноты связи величин X и Y . Дело в том, что одинаковые значения коэффициентов a_0 и a_1 могут быть получены при различной степени разброса пар значений x_q и y_q . При использовании линейной регрессии таким показателем является линейный коэффициент корреляции r_{XY} , который можно рассчитать по следующим формулам:

$$r_{XY} = a_1 \frac{\sigma_X}{\sigma_Y} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y},$$

где $\text{cov}(X, Y) = \left[\frac{1}{n} \sum_{q=1}^n (x_q y_q) - x_{\text{cp}} y_{\text{cp}} \right]$ – ковариация⁶⁶ X и Y ;

$$x_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n x_q; \quad y_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n y_q;$$

$$\sigma_X^2 = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n (x_q - x_{\text{cp}})^2 = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n x_q^2 - (x_{\text{cp}})^2;$$

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n (y_q - y_{\text{cp}})^2 = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n y_q^2 - (y_{\text{cp}})^2.$$

Линейный коэффициент корреляции r_{XY} может принимать значения в пределах от -1 до $+1$. Чем ближе абсолютное значение r_{XY} к единице, тем сильнее линейная связь внутри пар x_q и y_q . При $r_{XY} = \pm 1$ имеем строгую функциональную связь X и Y ⁶⁷.

Для оценки качества подбора линейной функции рассчитывается квадрат линейного коэффициента корреляции r_{XY}^2 , называемый коэффициентом детерминации. Коэффициент детерминации характеризует долю дисперсии Y , объясняемую регрессией, в общей дисперсии Y . Соответственно величина $1 - r_{XY}^2$ характеризует долю дисперсии Y , вызванную влиянием остальных, не учтенных в модели, факторов.

⁶⁶ Для ковариации существует и другой вариант расчетной формулы:

$$\text{cov} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n [(x_q - x_{\text{cp}})(y_q - y_{\text{cp}})].$$

⁶⁷ Близость линейного коэффициента корреляции r_{XY} к нулю еще не означает отсутствие связи между величинами. При другой (нелинейной) модели связь между величинами может оказаться достаточно тесной.

После того, как найдено уравнение линейной регрессии, проводится оценка значимости как уравнения в целом, так и его отдельных параметров.

Проверить значимость уравнения регрессии – значит установить, соответствует ли математическая модель, выражающая зависимость между переменными, экспериментальным данным и достаточно ли включенных в уравнение регрессии переменных (одной или нескольких) для описания зависимой переменной Y .

Чтобы иметь общее суждение о качестве аппроксимационной модели по относительным отклонениям для каждой пары измеренных величин, определяют среднюю ошибку аппроксимации:

$$A_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n \left| \frac{y_q - y^*(x_q)}{y_q} \right| \cdot 100 \%$$

Значимость уравнения регрессии в целом оценивается на основе F -критерия Фишера, которому предшествует дисперсионный анализ. В математической статистике он рассматривается как инструмент статистического анализа, в частности как вспомогательное средство для изучения качества регрессионной модели.

С позиций дисперсионного анализа, общая сумма квадратов отклонений переменной Y от среднего значения y_{cp} может рассматриваться как сумма двух составных частей – «объясненной» и «необъясненной»:

$$\sum_{q=1}^n (y_q - y_{\text{cp}})^2 = \sum_{q=1}^n [y^*(x_q) - y_{\text{cp}}]^2 + \sum_{q=1}^n [y_q - y^*(x_q)]^2,$$

где $\sum_{q=1}^n [y^*(x_q) - y_{\text{cp}}]^2$ – сумма квадратов отклонений, объясненная регрессией (факторная сумма квадратов отклонений);

$\sum_{q=1}^n [y_q - y^*(x_q)]^2$ – остаточная сумма квадратов отклонений,

характеризующая влияние неучтенных в регрессионной модели факторов.

Основные показатели дисперсионного анализа приведены в табл. 8.1.

Чем меньше остаточная дисперсия $S_{\text{ост}}^2$, тем более адекватной является рассчитанная регрессионная модель, тем меньшее влияние не учитываемых моделью факторов проявляется в исходных данных.

Таблица 8.1

Основные показатели дисперсионного анализа

Компоненты дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия
Общая	$\sum_{q=1}^n (y_q - y_{\text{cp}})^2$	$n-1$	$S_{\text{общ}}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{q=1}^n (y_q - y_{\text{cp}})^2$ (8.4)
Факторная	$\sum_{q=1}^n [y^*(x_q) - y_{\text{cp}}]^2$	m	$S_{\text{Ф}}^2 = \frac{1}{m} \sum_{q=1}^n [y^*(x_q) - y_{\text{cp}}]^2$ (8.5)
Остаточная	$\sum_{q=1}^n [y^*(x_q) - y_q]^2$	$n-m-1$	$S_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{n-m-1} \sum_{q=1}^n [y^*(x_q) - y_q]^2$ (8.6)

n – число пар данных испытаний; m – число параметров при переменной X

Объем экспериментальных данных рекомендуется выбирать таким, чтобы количество пар значений переменных в 7–8 раз превышал число рассчитываемых параметров при переменной X . Для линейной регрессии при переменной X один параметр – a_1 , поэтому для нее следует брать не менее 7 пар значений параметров X и Y . Если аппроксимирующая функция будет полиномом 2-й степени вида $y^*(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$, то минимальный объем экспериментальных данных – 14–16 пар значений переменных.

Отношение факторной дисперсии к остаточной является величиной F -критерия Фишера:

$$F = \frac{S_{\text{Ф}}^2}{S_{\text{ост}}^2}. \quad (8.7)$$

Значение F -критерия Фишера, рассчитанное по формуле (8.7), сравнивают с табличным значением $F_{\text{табл}}$ (прил. И, табл. И1). Табличное значение $F_{\text{табл}}$ выбирается по его трем параметрам: α – уровню значимости и двум коэффициентам $k_1 = m$ и $k_2 = n - m - 1$. Если расчетное значение F -критерия больше табличного, то уравнение регрессии признается в целом статистически значимым.

В случае линейной регрессии $m = 1$, для F -критерия можно записать

$$F = \frac{S_{\Phi}^2}{S_{\text{ост}}^2} = \frac{\sum_{q=1}^n [y^*(x_q) - y_{\text{ср}}]^2}{\sum_{q=1}^n [y_q - y^*(x_q)]^2} (n - 2). \quad (8.8)$$

Величину F -критерия можно выразить через коэффициент детерминации r^2_{XY} :

$$F = \frac{r^2_{XY}}{1 - r^2_{XY}} \frac{(n - m - 1)}{m} = \frac{r^2_{XY}}{1 - r^2_{XY}} (n - 2). \quad (8.9)$$

В парной линейной регрессии оценивается значимость не только уравнения в целом, но и его отдельных параметров. Для этого для каждого из параметров определяют его стандартную ошибку: m_{a0} и m_{a1} .

Стандартная ошибка коэффициента регрессии m_{a1} определяется по формуле

$$m_{a1} = \frac{S_{\text{ост}}}{\sigma_X \sqrt{n}}, \quad (8.10)$$

где $S_{\text{ост}}$ – остаточное среднее квадратическое отклонение

$$S_{\text{ост}} = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^n [y_q - y^*(x_q)]^2}{n - 2}}. \quad (8.11)$$

Для оценки существенности коэффициента регрессии m_{a1} его сравнивают с его же стандартной ошибкой, то есть определяется фактическое значение t -критерия Стьюдента:

$$t_{a1} = a_1 / m_{a1},$$

которое сравнивается с табличным значением при уровне значимости α и числе степеней свободы $(n - 2)$. Доверительный интервал для коэффициента регрессии a_1 определяется как $a_1 \pm t_{\text{табл}} m_{a1}$.

Стандартная погрешность коэффициента m_{a0} определяется по формуле

$$m_{a0} = \frac{S_{\text{ост}} \sqrt{\sum_{q=1}^n x_q^2}}{\sigma_X n}. \quad (8.12)$$

Значимость линейного коэффициента корреляции проверяется по величине его погрешности

$$m_r = \sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 2}}.$$

Фактическое значение t -критерия Стьюдента определяется по формуле

$$t_r = r / m_r.$$

Рассмотрим пример. По данным совместных испытаний методом упругого отскока и на прессе 11 бетонных образцов-кубов для каждого получена пара значений (табл. 8.2) индекса отскока I и прочности при одноосном сжатии $f_{c,I}$. Используя указанные данные, построим градуировочную зависимость для метода упругого отскока в форме уравнения линейной регрессии (8.1).

Таблица 8.2

Данные испытаний бетонных образцов

Индекс отскока, I	35	36	41	38	32	30	40	39	32	31	34
$f_{c,I}$, МПа	30	31	34,5	32	28	28,5	34	34,5	30	29,5	29,5

Для решения задачи воспользуемся программой Microsoft Excel. Отметим ячейку (С9) и применим функцию «ЛИНЕЙН» мастера функций (рис. 8.3 и 8.4).

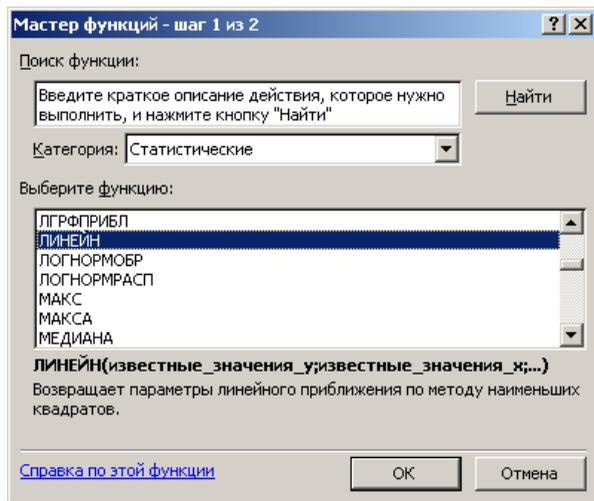


Рис. 8.3. Выбор функции из перечня мастера функций

В открывшемся окне (см. рис. 8.4) введем значения y и x . Значения «Конст» и «Статистика» установим равными 1.

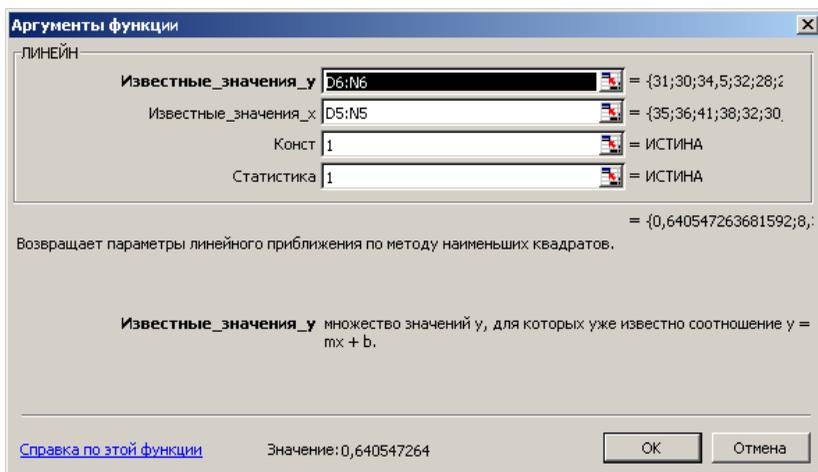


Рис. 8.4. Ввод аргументов функции линейной регрессии

В выделенной ячейке С9 появится число 1,352594. Выделим область ячеек, содержащую 2 столбца и 5 строк таким образом, чтобы ячейка С9 оказалась в левом верхнем углу выделенной области (рис. 8.5).

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
4													
5		Индекс отскока, I	35	36	41	38	32	30	40	39	32	31	34
6		$f_{c,I}$, МПа	30	31	34,5	32	28	28,5	34	34,5	30	29,5	29,5
7													
8													
9		0,5805348											
10													
11													
12													
13													
14													

Рис. 8.5. Вывод коэффициента регрессии a_1

Затем следует нажать F2, после чего – комбинацию «Ctrl–Shift–Enter». В выделенную область будет выведен массив показателей (рис. 8.6).

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
4													
5		Индекс отскока, I	35	36	41	38	32	30	40	39	32	31	34
6		$f_{c,I}$, МПа	30	31	34,5	32	28	28,5	34	34,5	30	29,5	29,5
7													
8													
9		0,5805348	10,5684										
10		0,072739	2,57937										
11		0,8761993	0,87946										
12		63,697482	9										
13		49,266296	6,96098										
14													
15													
16													
17													
18													

	C	D
9	коэффициент a_1	коэффициент a_0
10	среднее квадратич. отклонение a_1	среднее квадратич. отклонение a_0
11	коэфф. детерминации r^2	S_f – остаточное среднее квадратич. отклонение y
12	F – критерий	число степеней свободы вариации $n-m-1$
13	регрессионная сумма квадратов	остаточная сумма квадратов

Рис. 8.6. Вывод массива показателей функции линейной регрессии

Таким образом, искомое уравнение регрессии имеет вид

$$f_{c,I} = 10,57 + 0,581I, \text{ МПа,}$$

где $f_{c,I}$ – оценка прочности бетона методом упругого отскока;
 I – индекс отскока.

Табличное значение F -критерия для уровня значимости $\alpha = 0,05$, $k_1 = n - m - 1 = 9$, $k_2 = n = 11$ равно 2,90. Фактическое значение ($F \approx 63,7$) значительно превосходит табличное, что указывает на

статистическую значимость уравнения регрессии в целом. Остаточное среднее квадратическое отклонение $S_{\text{ост}} \approx 0,88$. Коэффициент детерминации $r^2 = 0,88$. На рис. 8.7 представлено графическое отображение исходных данных испытаний и полученной градуировочной зависимости.

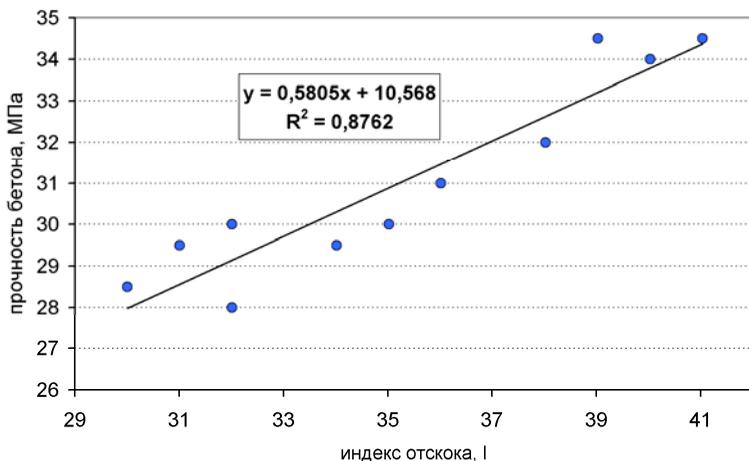


Рис. 8.7. График регрессионной линейной зависимости и массив точек данных испытаний

Нелинейная градуировочная зависимость

В ряде случаев нелинейная функциональная зависимость между оцениваемым и косвенным параметром может оказаться более точным описанием их связи. Часто в качестве нелинейных градуировочных зависимостей используют полиномы разных степеней

$$y^*(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n, \quad (8.13)$$

степенные функции

$$y^*(x) = ax^b, \quad (8.14)$$

показательные и экспоненциальные функции вида

$$y^*(x) = ab^x; \quad (8.15)$$

$$y^*(x) = e^{(b+cx)}. \quad (8.16)$$

Полиномиальная зависимость приводится к линейному виду подстановкой: $x_1 = x$, $x_2 = x^2$, ..., $x_n = x^n$. В результате получаем линейное многофакторное уравнения вида

$$y^*(x) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n. \quad (8.17)$$

Степенная зависимость $y^*(x) = ax^b$ приводится к линейному виду логарифмированием:

$$\ln(y^*) = \ln(a \cdot x^b) = \ln(a) + b \ln(x) = A + bz. \quad (8.18)$$

Значения коэффициентов A и b полученного уравнения $u^* = A + bz$ могут быть рассчитаны с использованием метода наименьших квадратов, по формулам (8.2) и (8.3). Возврат к исходной форме уравнения регрессии производится потенцированием.

Для экспоненциальной зависимости $y^*(x) = e^{(b+cx)}$ переход к линейной форме осуществляется аналогично:

$$\ln(y^*) = \ln(e^{(b+cx)}) = b + cx. \quad (8.19)$$

Коэффициенты полученного уравнения $u^* = b + cx$ также могут быть получены использованием метода наименьших квадратов.

Если для линейной регрессии показателем тесноты связи величин X и Y является линейный коэффициент корреляции r_{XY} , то для нелинейной зависимости таким показателем является индекс корреляции ρ_{XY} , рассчитываемый по формуле

$$\rho_{XY} = \sqrt{1 - \frac{\sigma_{\text{ост}}^2}{\sigma_Y^2}}, \quad (8.20)$$

где $\sigma_Y^2 = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n (y_q - y_{\text{ср}})^2$;

$$\sigma_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n [y^*(x_q) - y_q]^2.$$

Значения показателя ρ_{XY} находятся в пределах 0–1. Чем ближе ρ_{XY} к единице, тем сильнее связь параметров X и Y . Квадрат индекса

корреляции ρ_{XY}^2 , называемый индексом детерминации, характеризует, как и для линейной регрессии, долю дисперсии Y , объясняемую регрессией в общей дисперсии Y .

Индекс детерминации используется для проверки существенности в целом уравнения регрессии по F -критерию Фишера:

$$F = \frac{\rho_{XY}^2}{1 - \rho_{XY}^2} \frac{(n - m - 1)}{m}, \quad (8.21)$$

где n – число пар данных испытаний;

m – число параметров при переменной x .

Фактическое значение F -критерия, полученное по формуле (8.21), сравнивают с табличным при уровне значимости α и числе степеней свободы $k_2 = n - m - 1$ и $k_1 = m$.

Индексы корреляции и детерминации можно сопоставлять с соответствующими коэффициентами линейной зависимости. Это позволяет подобрать наиболее подходящую форму регрессии. Если индекс корреляции ρ_{XY} близок к значению коэффициента корреляции r_{XY} , то нет необходимости усложнять регрессионное уравнение нелинейностями, можно ограничиться линейной функцией.

В качестве примера экспоненциальной регрессии воспользуемся табл. 8.2, по данным которой построим градуировочную зависимость для метода упругого отскока в форме уравнения (8.16). Зависимость (8.16) можно записать в следующем виде:

$$y^*(x) = e^{(b+cx)} = e^b(e^c)^x = Bm^x. \quad (8.22)$$

Расчет коэффициентов выполним с использованием MS Excel. Отметим ячейку (C9) и применим функцию «ЛГРФПРИБЛ» мастера функций. Дальнейшая последовательность действий такая же, как и для рассмотренного выше примера линейной регрессии. На рис. 8.8 приведены показатели функции экспоненциальной регрессии. Регрессионная зависимость имеет вид

$$y^*(x) = 16,13 \cdot 1,01866^x, \text{ МПа.} \quad (8.23)$$

Сопоставляя показатели экспоненциальной и линейной регрессий (см. рис. 8.8 и 8.6), можно констатировать, что показатели экс-

поненциальной регрессии незначительно лучше, чем у линейной. В частности, индекс детерминации равен 0,878 против 0,876 для линейной регрессии; F -критерий равен 64,5 против 63,7.

Следует иметь в виду, что остаточная сумма квадратов и остаточное среднее квадратическое отклонение – ячейки D11 и D13 (см. рис. 8.8) – рассчитываются функцией «ЛГРФПРИБЛ» не для величин $y(x)$ и $y^*(x)$, а для их логарифмов, то есть значение в ячейке D11 вычисляется по формуле

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln(y_i(x_i)) - \ln(y_i^*(x_i))]^2}{n - m - 1}}. \quad (8.24)$$

Для расчета остаточного среднего квадратичного отклонения $S_{\text{ост}}$ необходимо воспользоваться формулой (8.11). В ячейке D23 (см. рис. 8.8) приведено значение этого показателя 0,849 МПа, который оказался несколько меньшим, чем для линейной регрессионной зависимости⁶⁸.

Для расчета параметров полиномиальной регрессии в EXCEL необходимо дополнительно рассчитать значения степеней косвен-

⁶⁸ Остаточное среднее квадратичное отклонение рассматривается в ряде нормативных документов, регламентирующих неразрушающие испытания бетона, в качестве одного из критериев при отбраковке данных испытаний при построении и коррекции градуировочной зависимости. В частности, по ГОСТ 17624–2012 «Бетон. Ультразвуковой метод определения прочности» для построения градуировочной зависимости используются только те данные испытаний образцов, которые удовлетворяют условию

$$\frac{|R_{H,i} - R_{\Phi,i}|}{S} \leq 2, \quad (8.25)$$

где $R_{H,i}$ – прочность, определенная по градуировочной зависимости;
 $R_{\Phi,i}$ – фактическая прочность (прочность по данным прессовых испытаний);
 S – остаточное среднее квадратическое отклонение.

После отбраковки данных, не удовлетворяющих условию (8.25), градуировочная зависимость устанавливается заново по оставшимся результатам испытаний.

ного параметра. Для примера ограничимся полиномом второй степени, имеющим вид

$$y^*(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2. \quad (8.26)$$

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
4													
5		Индекс отскока, <i>I</i>	35	36	41	38	32	30	40	39	32	31	34
6		<i>f_{с.п.}</i> , МПа	30	31	34,5	32	28	28,5	34	34,5	30	29,5	29,5
7													
8													
9													
10		1,0186584	16,1316										
11		0,0022992	0,08153										
12		0,8777967	0,0278										
13		64,64776	9										
14		0,0499574	0,00695										
15													
16													
17													
18													
19													
20		<i>y</i> *	30,8089	31,3837	34,4229	32,5658	29,1467	28,0888	33,7924	33,1734	29,1467	28,6129	30,2446
21		(<i>y</i> - <i>y</i> *) ²	0,65426	0,14723	0,00595	0,3201	1,31502	0,1691	0,04312	1,75988	0,72805	0,787	0,55435
22		Σ	6,48405										
23		<i>S_T</i>	0,84879										

Рис. 8.8. Расчет показателей функции экспоненциальной регрессии

Дополним таблицу данных испытаний строкой D6:N6 (рис. 8.9), в которую занесем квадраты индекса отскока *I*. Применим функцию «ЛИНЕЙН» мастера функций (см. рис. 8.3). В качестве значений *X* используем двумерный массив D5:N6. Дальнейшие действия такие же, как и для случая линейной регрессии. В таблице C10:E14 приведены основные параметры полиномиальной (параболической) регрессии. Используя данные, приведенные в таблице C10:E14, запишем уравнение регрессии в виде

$$y^*(x) = 61,9 - 2,34x + 0,0412x^2, \text{ МПа.} \quad (8.27)$$

В строках 16:19 (см. рис. 8.9) приведены результаты «проверки» расчетов остаточного среднего квадратического отклонения по формулам (8.6) и (8.27).

Сопоставляя показатели полиномиальной и линейной регрессий для приведенных данных испытаний, можно констатировать увеличение коэффициента детерминации до значения 0,91 (против 0,88) и снижение остаточного среднего квадратического отклонения до 0,79 МПа (против 0,88 МПа), что делает полиномиальную регрессию для приведенного массива данных предпочтительной.

4														
5		Индекс отскока, I	35	36	41	38	32	30	40	39	32	31	34	
6		I^2	1225	1296	1681	1444	1024	900	1600	1521	1024	961	1156	
7		f _{с.т.} , МПа	30	31	34,5	32	28	28,5	34	34,5	30	29,5	29,5	
8														
9		a2	a1	a0										
10		0,04117701	-2,3438	61,93949										
11		0,02282953	1,622627	28,57463										
12		0,91198926	0,786496	#Н/Д										
13		41,4489993	8	#Н/Д										
14		51,2786689	4,948604	#Н/Д										
15														
16		y* =	30,34829	30,92806	35,0622	32,33465	29,10312	28,68477	34,07067	33,16148	29,10312	28,85277	29,85088	
17		(y-y*)^2 =	0,121307	0,005176	0,318071	0,111993	1,216885	0,03414	0,004994	1,791829	0,804401	0,418912	0,123118	
18		Σ	4,948604											
19		Ст	0,786496											

Рис. 8.9. Расчет показателей полиномиальной регрессии

Кроме рассмотренных функций «ЛИНЕЙН» и «ЛГРФПРИБЛ», регрессионный анализ в EXCEL можно осуществлять, используя функцию «Регрессия» из пакета «Анализ данных». Удобным и «быстрым» способом построения градуировочной зависимости является также использование процедуры «Добавить линию тренда» из комплекса графических средств EXCEL. На рис. 8.10 приведены результаты использования этой процедуры применительно к данным рассмотренных выше примеров.

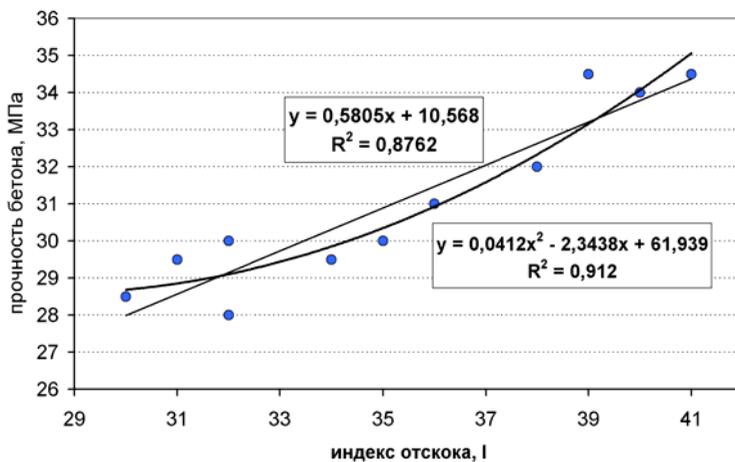


Рис. 8.10. Графики регрессионных линейной и полиномиальной зависимостей

Особенности построения градуировочных зависимостей для определения прочности бетона по действующим ТНПА

Основными нормативными документами в Республике Беларусь, регламентирующими неразрушающие испытания бетона механическими методами, являются СТБ 2264, ГОСТ 22690, СТБ EN 13791. Процедура построения градуировочных зависимостей по этим нормативам базируется на рассмотренных выше принципах регрессионного анализа. Но при этом дополнительно вводится ряд критериев и ограничений, по которым определяется пригодность полученных зависимостей для практического использования⁶⁹. Кроме процедуры построения градуировочной зависимости, в практике испытаний бетона востребованной является процедура коррекции (уточнения) градуировочной зависимости, например, в случаях изменения условий испытаний или условий изготовления бетона. Коррекция имеющейся градуировочной зависимости косвенных методов испытаний может также производиться при наличии данных прямых испытаний прочности бетона, например, по данным отобранных образцов-кернов.

Заметим, что порядок построения градуировочной зависимости по каждому из указанных выше стандартов примерно совпадает, но имеются и отличия. Рассмотрим некоторые из них.

По ГОСТ 22690 градуировочная зависимость может устанавливаться по трем вариантам процедуры, на основании следующих данных:

– результатов параллельных⁷⁰ испытаний одних и тех же участков конструкции одним из косвенных методов и прямым неразрушающим методом определения прочности бетона;

⁶⁹ Следует иметь в виду, что сегодня в Республике Беларусь действуют 3 основные группы стандартов, регламентирующих испытания бетона: национальные стандарты, ряд стандартов Российской Федерации и постепенно расширяющийся перечень стандартов Евросоюза. По ряду пунктов эти стандарты не совпадают. Большая часть отличий не носит принципиального характера, но оценки прочности бетона на основе разных критериев может приводить к конфликтным ситуациям между поставщиком бетона, производителем бетонных работ и надзорными службами.

⁷⁰ Придерживаясь классификации измерений, рассмотренной в разделе 2.3, термин «параллельные измерения», использованный в ГОСТ 22690, будет соответствовать термину «совместные измерения».

– результатов испытаний участков конструкций одним из косвенных неразрушающих методов и испытаний образцов-кернов, отобранных из тех же участков конструкции и испытанных в соответствии с ГОСТ 28570;

– результатов испытаний стандартных бетонных образцов одним из косвенных неразрушающих методов определения прочности бетона и механических испытаний по ГОСТ 10180.

8.1. Построение градуировочной зависимости по СТБ 2264

По СТБ 2264 градуировочная зависимость устанавливается только по результатам испытаний образцов:

{4.1⁷¹} Прочность бетона определяют по предварительно установленным градуировочным зависимостям между прочностью бетонных образцов по ГОСТ 10180 и косвенными характеристиками прочности (показаниями приборов).

{6.2} Градуировочную зависимость устанавливают заново при изменении вида крупного заполнителя, технологии производства бетона, при внесении количественных изменений в номинальный состав бетона по расходу цемента на 20 %, крупного заполнителя – на 10 %.

{6.3} Для установления градуировочных зависимостей используют не менее 15 серий образцов-кубов (далее – образцов) по ГОСТ 10180 или не менее 30 отдельных образцов-кубов (далее – отдельных образцов). При установлении градуировочной зависимости для метода отрыва со скалыванием в каждую серию из 15 образцов дополнительно включают не менее трех образцов размерами 200 × 200 × 200 или 300 × 300 × 300 мм.

Образцы для установления градуировочных зависимостей изготавливают в соответствии с ГОСТ 10180 в разные смены в течение не менее 5 суток из бетона одного состава, одной и той же технологии и при том же режиме тепловлажностной обработки или тех же условиях твердения, что и конструкции, подлежащие контролю.

{6.14} При установлении градуировочной зависимости за единичное значение косвенной характеристики прочности принимают

⁷¹ Нумерация в фигурных скобках соответствует нумерации пунктов в СТБ 2264–2012.

среднее арифметическое значение этой величины серии образцов (или образца), используемых для определения единичного значения прочности.

{6.15} Среднее квадратическое (остаточное) отклонение градуировочной зависимости S_T от среднего значения прочности $f_{c,cube,F}$ не должно превышать:

12 % – при использовании серии образцов;

15 % – при использовании отдельных образцов⁷².

Методика установления градуировочных зависимостей по СТБ 2264 и оценка их погрешностей приведены в прил. Е.

8.2. Построение градуировочной зависимости по результатам испытаний прочности бетона в конструкциях по ГОСТ 22690

(6.2.1)⁷³ При построении градуировочной зависимости по результатам испытаний прочности бетона в конструкциях зависимость устанавливают по единичным значениям косвенного параметра и прочности бетона одних и тех же участков конструкции.

За единичное значение косвенного параметра принимают среднее значение косвенного показателя в участке. За единичное значение прочности бетона принимают прочность бетона участка, определенную прямым неразрушающим методом или испытанием отобранных образцов.

(6.2.2) Минимальное число единичных испытаний для построения градуировочной зависимости по результатам испытаний прочности бетона в конструкции – 12⁷⁴.

⁷² Остаточное среднее квадратическое отклонение рассматривается в нормативах в качестве основного критерия при отбраковке данных испытаний при построении и коррекции градуировочной зависимости. Этот же показатель принимается в качестве погрешности при определении прочности бетона по полученной градуировочной зависимости.

⁷³ Нумерация пунктов в этом подразделе идентична принятой в ГОСТ 22690.

⁷⁴ По СТБ EN 13791–2012 градуировочная зависимость строится по результатам испытаний прочности бетона в конструкциях и должна основываться на не менее чем 18 парах результатов, то есть необходимо получить 18 результатов испытаний выбуренных кернов и 18 результатов испыта-

(6.2.3) При построении градуировочной зависимости по результатам испытаний прочности бетона в конструкциях в зонах испытаний предварительно проводят измерения косвенным неразрушающим методом.

Затем выбирают участки в количестве, предусмотренном п. 6.2.3, на которых получены максимальное, минимальное и промежуточные значения косвенного показателя.

После испытаний косвенным неразрушающим методом участки испытывают прямым неразрушающим методом или отбирают образцы по ГОСТ 28570.

(6.2.4) Для определения прочности при отрицательной температуре бетона участки, выбранные для построения или привязки градуировочной зависимости, сначала испытывают косвенным неразрушающим методом, а затем отбирают образцы для последующего испытания при положительной температуре или отогревают внешними источниками тепла (инфракрасные излучатели, тепловые пушки и др.) на глубину 50 мм до температуры не ниже 0 °С и испытывают прямым неразрушающим методом.

Отбраковка результатов испытаний, используемых для построения градуировочной зависимости при отрицательной температуре, допускается только в том случае, если отклонения связаны с нарушением процедуры испытания. При этом отбрасываемый результат должен быть заменен результатами повторного испытания в той же зоне конструкции.

8.3. Построение градуировочной зависимости по контрольным образцам по ГОСТ 22690

Данная процедура практически полностью совпадает с аналогичной по СТБ 2264. Приведем только несколько пунктов.

(6.3.2) При построении градуировочной зависимости по результатам испытаний образцов-кубов используют не менее 15 серий образцов-кубов по ГОСТ 10180 или не менее 30 отдельных образцов-кубов. Образцы изготавливают в соответствии с требованиями

ний косвенными методами, которые относятся к одной области измерений конструкции. Данное количество результатов является минимальным; предпочтительным является наличие большего количества результатов.

ГОСТ 10180 в разные смены, в течение не менее 3 суток, из бетона одного номинального состава, по одной технологии, при том же режиме твердения, что и конструкция, подлежащая контролю.

(6.3.5) Для определения косвенных характеристик прочности проводят испытания согласно требованиям раздела 7 на боковых (по направлению бетонирования) гранях образцов-кубов.

Общее число измерений на каждом образце для метода упругого отскока, ударного импульса, пластической деформации при ударе должно быть не менее установленного числа испытаний на участке по табл. 8.3, а расстояние между местами ударов – не менее 30 мм (15 мм для метода ударного импульса). Для метода пластической деформации при вдавливании число испытаний на каждой грани должно быть не менее двух, а расстояние между местами испытаний – не менее двух диаметров отпечатков.

Таблица 8.3

Требования к участкам испытаний

Наименование метода	Общее число измерений на участке	Минимальное расстояние между местами измерений на участке, мм	Минимальное расстояние от края конструкции до места измерения, мм	Минимальная толщина конструкции, мм
Упругий отскок	9	30	50	100
Ударный импульс	10	15	50	50
Пластическая деформация	5	30	50	70
Скалывание ребра	2	200	–	170
Отрыв	1	2 диаметра диска	50	50
Отрыв со скалыванием при рабочей глубине заделки анкера h : ≥ 40 мм; < 40 мм	1 2	$5h$	150	$2h$

(6.3.6) При испытаниях методом упругого отскока, ударного импульса, пластической деформации при ударе образцы должны быть зажаты в прессе с усилием не менее (30 ± 5) кН и не более 10 % ожидаемого значения разрушающей нагрузки.

Порядок построения градуировочной зависимости по ГОСТ 22690 практически идентичен порядку, регламентируемому СТБ 2264.

Условия применения градуировочной зависимости по ГОСТ 22690 определяются по следующим критериям:

применение градуировочной зависимости для определения прочности бетона допускается только для значений косвенной характеристики H , попадающей в диапазон от H_{\min} до H_{\max} ;

если коэффициент корреляции $r < 0,7$ или $S_{T.H.M} / R_{ф.ср} > 0,15$, то проведение контроля и оценка прочности по полученной зависимости не допускается⁷⁵.

Корректировка установленной градуировочной зависимости по ГОСТ 22690 должна проводиться не реже одного раза в месяц с учетом дополнительно получаемых результатов испытаний.

При корректировке градуировочной зависимости к существующим результатам испытаний добавляют не менее трех новых результатов, полученных при минимальном, максимальном и промежуточном значениях косвенного показателя.

По мере накопления данных для построения градуировочной зависимости результаты предыдущих испытаний, начиная с самых первых, отбраковывают, чтобы общее число результатов не превышало 20. После добавления новых результатов и отбраковки старых минимальное и максимальное значения косвенной характеристики, градуировочную зависимость и ее параметры устанавливают вновь по формулам.

⁷⁵ По п. 6.3.2 и по условиям применения требования СТБ 2264 и ГОСТ 22690 совпадают. Для коэффициента корреляции $r \geq 0,7$ критерий Фишера, рассчитываемый по формуле (8.21) для числа испытаний $n \geq 15$, будет не менее 13, что превышает его табличное значение.

8.4. Построение градуировочной зависимости для ультразвукового импульсного метода по ГОСТ 17624-2012

Так же как и для механических методов испытаний бетона, процедура построения градуировочных зависимостей для ультразвукового импульсного метода базируется на рассмотренных выше принципах регрессионного анализа⁷⁶. Ниже приведены наиболее характерные пункты стандарта.

{6.2}⁷⁷ Для контроля прочности бетона при поверхностном прозвучивании градуировочную зависимость устанавливают на основании следующих данных:

– результатов параллельных испытаний одних и тех же участков конструкций ультразвуковым методом и методом отрыва со скалыванием по ГОСТ 22690;

– результатов испытаний конструкций ультразвуковым методом и механических испытаний образцов-керна, отобранных из тех же участков конструкций и испытанных в соответствии с ГОСТ 28570;

– результатов испытаний ультразвуковым методом и механических испытаний одних и тех же стандартных бетонных образцов по ГОСТ 10180.

По данному пункту три перечисленных методики построения градуировочных зависимостей по ГОСТ 17624 совпадают с методиками ГОСТ 22690.

{6.3} Для контроля прочности бетона при сквозном прозвучивании градуировочную зависимость устанавливают на основании следующих данных:

– результатов испытаний ультразвуковым методом участков конструкций и испытаний в соответствии с ГОСТ 28570 образцов-керна, отобранных из тех же участков конструкций;

⁷⁶ Не допускается применение ультразвуковых приборов, градуированных в единицах прочности бетона, для непосредственного определения его прочности (п. 5.6 ГОСТ 17624).

⁷⁷ Нумерация пунктов этого подраздела идентична принятой в ГОСТ 17624. Курсивом выделен текст норматива.

– результатов испытаний ультразвуковым методом и механических испытаний одних и тех же стандартных бетонных образцов по ГОСТ 10180.

{6.4} Градуировочные зависимости устанавливают отдельно по каждому виду нормируемой прочности, указанному в 4.1 для бетонов одного номинального состава. Допускается строить одну градуировочную зависимость для бетонов одного вида, отличающихся по номинальному составу и значению нормируемой прочности, но не более трех нормированных классов.

{6.5} При построении градуировочной зависимости по результатам параллельных испытаний ультразвуковым методом и методом отрыва со скалыванием или испытаний образцов, отобранных из конструкций, на подлежащих испытанию конструкциях или их зонах предварительно проводят ультразвуковые измерения и определяют участки с минимальным и максимальным косвенными показателями. Затем выбирают не менее 12 участков, включая участки, в которых значение косвенного показателя максимальное, минимальное и имеет промежуточные значения.

После испытания ультразвуковым методом эти участки испытывают методом отрыва со скалыванием по ГОСТ 22690 или отбирают из них образцы для испытания по ГОСТ 28570.

{6.6} Возраст бетона отдельных участков не должен отличаться более чем на 25 % от среднего возраста бетона зоны конструкции или группы конструкций, подлежащей контролю. Возраст отдельных участков конструкции не учитывают, если градуировочную зависимость устанавливают для конструкций, возраст которых превышает два месяца.

{6.7} На каждом участке определяют положение арматуры, а затем ультразвуковым прибором проводят не менее двух измерений косвенного показателя. Прозвучивание проводят в двух взаимно перпендикулярных направлениях под углом примерно 45° к направлению арматуры, параллельно или перпендикулярно к ней. При прозвучивании в направлении, параллельном арматуре, линию прозвучивания располагают между арматурными стержнями (рис. 8.11).

Отклонение отдельных результатов измерений скорости или времени распространения ультразвука на каждом участке от среднего арифметического значения результатов измерений для данного участка не должно превышать 2 %. Результаты измере-

ний, не удовлетворяющие этому условию, не учитывают при вычислении среднеарифметического значения скорости (времени) распространения ультразвука для данного участка.

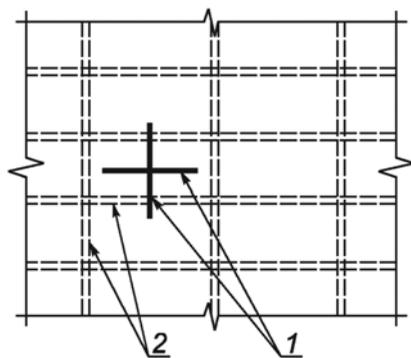


Рис. 8.11. Расположение линии прозвучивания:
1 – положение прибора при испытании; 2 – расположение арматуры

{6.8} Градуировочную зависимость устанавливают по единичным значениям косвенного показателя и прочности бетона. За единичное значение косвенного показателя принимают среднее значение косвенных показателей на участке. За единичное значение прочности бетона принимают прочность бетона участка, определенную методом отрыва со скалыванием или испытанием отобранных образцов.

При построении градуировочной зависимости по результатам испытаний образцов-кубов за единичное значение прочности бетона принимают среднюю прочность бетона в серии образцов, определенную по ГОСТ 10180.

{6.11} При построении градуировочной зависимости по результатам испытаний ультразвуковым методом бетонных образцов-кубов и механических испытаний тех же образцов-кубов механические испытания проводят по ГОСТ 10180 после испытаний ультразвуковым методом.

При необходимости проведения ультразвуковых испытаний бетона конструкций после термообработки (горячего бетона) для определения отпускной прочности бетона этих конструкций после их остывания допускается устанавливать градуировочную зависимость по

результатам испытаний ультразвуковым методом горячих образцов и механических испытаний тех же образцов после их остывания.

{6.12} Для построения градуировочной зависимости по результатам испытаний образцов-кубов используют результаты испытаний не менее 15 серий образцов-кубов.

Образцы изготовляют в соответствии с требованиями ГОСТ 10180 в разные смены, в течение не менее трех суток, из бетонной смеси того же номинального состава, по той же технологии, при том же режиме твердения, что и конструкции, подлежащие контролю.

{6.13} При установлении градуировочной зависимости для метода сквозного прозвучивания по результатам испытаний образцов-кубов измерения проводят, как показано на рис. 8.12.

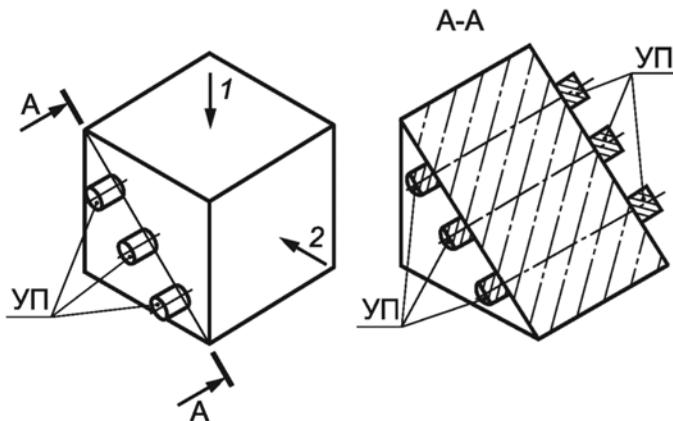


Рис. 8.12. Схема испытания образцов-кубов способом сквозного прозвучивания:
УП – ультразвуковые преобразователи; 1 – направление формования;
2 – направление испытания при сжатии

{6.14} База прозвучивания должна быть не менее 100 мм. Допускается базу прозвучивания уменьшать до 70 мм при испытании мелкозернистых бетонов и бетонов на ранних стадиях твердения (скорость ультразвука менее 2000 м/с).

{6.15} При установлении градуировочной зависимости для метода поверхностного прозвучивания по результатам испытаний образцов-кубов изменения проводят в соответствии с рис. 8.13.

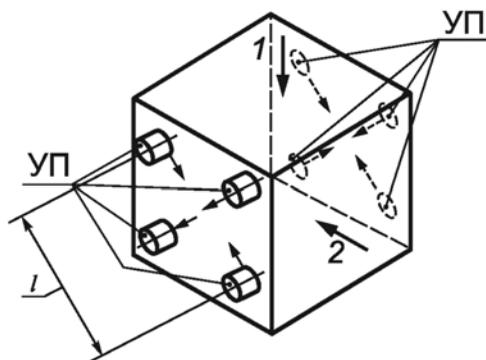


Рис. 8.13. Схема испытания образцов-кубов способом поверхностного прозвучивания:
 l – база прозвучивания; 1 – направление формования;
 2 – направление испытания при сжатии

{6.16} Число измерений на каждом образце должно быть при сквозном прозвучивании три, при поверхностном – четыре.

{6.17} Отклонение отдельного результата измерения косвенного показателя в каждом образце от среднеарифметического значения результатов измерений для данного образца не должно превышать 2 %.

Результаты измерения времени распространения ультразвука в образцах-кубах, не удовлетворяющие указанному условию, не учитывают при расчете среднеарифметического значения косвенного показателя в данной серии образцов. При наличии в серии двух образцов, не удовлетворяющих этому условию, результаты испытаний серии бракуют.

{6.18} В зоне контакта ультразвуковых преобразователей с поверхностью бетона не должно быть раковин и воздушных пор глубиной более 3 мм и диаметром более 6 мм, а также выступов высотой более 0,5 мм. Поверхность бетона должна быть очищена от пыли.

{6.19} Относительная погрешность измерения базы прозвучивания не должна превышать 0,5 %.

{6.20} Методика установления, корректировки градуировочной зависимости, оценки ее погрешности и условия ее применения приведены в прил. Б.

Рекомендуется использовать линейную зависимость $R = aH + b$, где R – прочность бетона, H – косвенный показатель.

{6.21} Проверка и корректировка установленной градуировочной зависимости с учетом дополнительно получаемых результатов испытаний должны проводиться не реже одного раза в месяц по методике, приведенной в прил. Б. Число образцов или участков при проведении корректировки должно быть не менее трех.

{6.22} Допускается ориентировочное определение прочности бетона с использованием зависимости, ранее установленной для бетона, отличающегося от испытываемого, или универсальной градуировочной зависимости.

{6.23} Универсальные градуировочные зависимости для тяжелых бетонов классов В7,5–В35 и В35–В60 приведены в прил. Г.

Указанные зависимости могут использоваться для ориентировочной оценки прочности бетона от 12,5 до 45 МПа и от 45 до 75 МПа соответственно при поверхностном прозвучивании с базой 150 мм.

{6.24} Ранее установленную или универсальную градуировочную зависимость для конкретных условий испытаний следует уточнять с помощью коэффициента совпадения, методика определения которого приведена в прил. Д.

{6.25} Установленные или универсальные градуировочные зависимости могут использоваться без привязки к конкретным условиям испытаний по прил. Д только для получения ориентировочных значений прочности. Не допускается использовать ориентировочные значения прочности для оценки класса бетона по прочности.

{7} Определение прочности бетона в конструкциях

{7.1} Число и расположение контролируемых участков в конструкциях должны соответствовать требованиям ГОСТ 18105 и указываться в проектной документации на конструкции или устанавливаться с учетом:

– задач контроля (определение фактического класса бетона, распалубочной или отпускной прочности, выявление участков пониженной прочности и др.);

– вида конструкций (колонны, балки, плиты и др.);

– размещения захваток и порядка бетонирования;

– армирования конструкций.

{7.2} Прочность бетона каждого участка конструкции может быть определена методом поверхностного или сквозного прозвучивания.

{7.3} Монолитные, а также сборные, конструкции, для которых применение сквозного прозвучивания затруднено (плоские, ребристые и многопустотные панели перекрытий, стеновые панели, трубы и т. д.), испытывают методом поверхностного прозвучивания.

{7.4} База при поверхностном прозвучивании при измерениях на конструкциях должна быть такой же, как и при установлении градуировочной зависимости.

{7.5} Возраст бетона контролируемой конструкции не должен отличаться от возраста бетона конструкции (образца), испытанной для установления градуировочной зависимости более чем на 50 % при контроле нормируемой прочности бетона и 25 % – при определении прочности бетона в процессе твердения.

{7.6} Качество поверхности бетона контролируемого участка конструкции в зоне контакта с ультразвуковыми преобразователями должно соответствовать требованиям, приведенным в п. 6.18.

{7.7} При сквозном прозвучивании ультразвуковое измерение следует проводить в направлении, перпендикулярном к направлению рабочей арматуры.

При поверхностном прозвучивании для исключения влияния арматуры измерение должно проводиться по схеме, приведенной на рис. 8.12.

{7.8} На каждом участке конструкции проводят не менее двух измерений при поверхностном прозвучивании и одно измерение – при сквозном. Отклонение отдельных результатов от среднего значения при поверхностном прозвучивании должно соответствовать условиям, приведенным в п. 6.7.

Прочность бетона каждого участка определяют по среднему значению скорости (времени) ультразвука по градуировочной зависимости, установленной в соответствии с разделом 6, при условии, что измеренное значение косвенного показателя находится в пределах между наименьшим и наибольшим значениями, полученными при построении или уточнении универсальной градуировочной зависимости.

{7.9} Статистическую оценку класса бетона по результатам испытаний ультразвуковым методом проводят по ГОСТ 18105

только в тех случаях, когда прочность бетона определяют по градуировочной зависимости, построенной в соответствии с раз-делом 6.

При использовании универсальных градуировочных зависимостей путем их привязки к конкретным условиям (прил. Д) не допускается проводить статистический контроль, при этом оценку бетона проводят по схеме Г ГОСТ 18105.

{7.10} Указания по назначению числа испытываемых участков монолитных и сборных конструкций при контроле прочности бетона неразрушающим ультразвуковым методом в зависимости от вида конструкции приведены в прил. Е.

9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА БЕТОНА ПО ПРОЧНОСТИ В КОНСТРУКЦИЯХ⁷⁸

Основной нормируемый показатель прочности бетона – его класс по прочности на сжатие, количественным показателем которого является так называемая *характеристическая прочность*⁷⁹ f_{ck} . Характеристическая прочность бетона может быть представлена двояко, в зависимости от вида используемых испытательных образцов⁸⁰. Если прочность бетона определяется по образцам-кубам, то это будет кубовая характеристическая прочность $f_{ck,cube}$, если по образцам

⁷⁸ Наблюдается устойчивая тенденция использования неразрушающих методов для контроля бетона в натуральных условиях. В частности, ГОСТ 18105–2010 рассматривает неразрушающие методы в качестве основных, а испытания контрольных образцов – в исключительных случаях.

⁷⁹ Именно под таким названием эта характеристика бетона фигурирует в стандартах Евросоюза, а также в СТБ EN 206 [40], СТБ EN 13791 [41]. В ряде нормативных документов РБ, в частности в СНБ 5.03.01, обозначения и названия характеристической прочности бетона изменены: $f_{ck,cyl}$ обозначается как f_{ck} и получила название нормативного сопротивления бетона осевому сжатию, а эквивалентом кубовой характеристической прочности $f_{ck,cube}$ стала так называемая гарантированная прочность f_c^G cube.

⁸⁰ По EN 206: «Для классификации бетона могут быть использованы характеристические значения прочности бетона на сжатие, определяемые в возрасте 28 суток на цилиндрах диаметром 150 мм и высотой 300 мм ($f_{ck,cyl}$) или кубах со стороной ребра 150 мм ($f_{ck,cube}$), испытанных в соответствии с EN 12390-3».

призмам или цилиндрам – призмная (цилиндровая) характеристическая прочность $f_{ck,cyl}$. Указанные характеристические прочностии в обозначении класса записываются в следующем порядке: $C_{f_{ck,cyl}/f_{ck,cube}}$, например, для бетона класса C20/25 $f_{ck,cyl} = 20$ МПа, $f_{ck,cube} = 25$ МПа. Поскольку величины характеристической прочностии взаимосвязаны, $f_{ck,cyl} = 0,8f_{ck,cube}$, то для оценки класса обычно используется одна из них.

Характеристическая прочность является статистическим параметром и определяется как 5 % квантиль прочностии бетона. Говоря иначе, характеристическая прочность является нижней (левой) границей одностороннего (несимметричного) доверительного интервала с доверительной вероятностью 95 % значений прочностии (см. рис. 3.7, б) и рассчитывается в общем случае по формуле

$$f_{ck} = f_m - t_d s \quad (9.1)$$

или

$$f_{ck} = f_m (1 - t_d V_f), \quad (9.2)$$

где f_m – среднее значение прочностии бетона;

t_d – коэффициент доверия (коэффициент охвата);

V_f – коэффициент вариации значений прочностии;

s – выборочное среднее квадратическое отклонение единичного значения прочностии, рассчитываемое по формуле (3.25).

При хорошей статистической обеспеченностии результатов испытаний образцов ($n > 30$) $t_d = 1,64$ (прил. А, табл. А1). При $n < 30$, $t_d = t_{st}$ для доверительной вероятностии $P_d = 0,90$.

Класс бетона принимается из нормированного ряда (см. табл. 9.1) из условия: расчетное значение характеристической прочностии должно быть не ниже ближайшего табличного значения.

Сегодня основными стандартами, нормирующими определение класса бетона по прочностии эксплуатируемых и возводимых конструкций в Республике Беларусь, являются СТБ EN 13791–2012 [41], СТБ 1544–2005 [39], ГОСТ 18105–2010 [12]. Следует иметь в виду, что по методикам определения характеристической прочностии и, что еще важнее, по критериям соответствия проектным классам по прочностии бетона у этих нормативов есть различия.

Ниже рассмотрены основные положения СТБ EN 13791–2012⁸¹ при расчете характеристической прочности и принятые критерии соответствия классу бетона. Рекомендации по построению градуировочных зависимостей рассмотрены в теме 8. Сразу заметим, что терминологически и по существу содержания этот стандарт ориентирован на концепцию неопределенности измерений (см. тему 4).

{7}⁸² *Оценка характеристической прочности на сжатие бетона в конструкциях посредством испытаний выбуренных кернов*

{7.1} Испытываемые образцы

Выбуренные керны отбирают, проверяют и подготавливают согласно указаниям EN 12504-1 и испытывают в соответствии с требованиями EN 12390-3 (ГОСТ 10180). Перед испытаниями их необходимо выдержать в течение 3 суток в лабораторных температурно-влажностных условиях. Факторы, влияющие на прочность на сжатие выбуренного керна, приведены в приложении {А} (прил. И).

Если выдерживание образцов в течение 3 суток выполнить невозможно, то необходимо задокументировать фактический срок выдержки. В таком случае должно быть оценено влияние данного отклонения.

Прочность на сжатие выбуренных кернов длиной и номинальным диаметром 100 мм соответствует прочности на сжатие куба со стороной 150 мм, который был изготовлен в аналогичных условиях.

Прочность на сжатие выбуренных кернов номинальным диаметром не менее 100 мм и не более 150 мм и соотношением длины к диаметру, равным 2, соответствует прочности на сжатие цилиндра размером 150×300 мм, который был изготовлен в аналогичных условиях.

Пересчет результатов испытаний выбуренных кернов диаметром от 50 до 150 мм и с другим соотношением длины к диаметру производится с помощью соответствующих стандартных переходных коэффициентов.

⁸¹ Сегодня продолжается модернизация нормативной базы Республики Беларусь, при этом ориентиром являются стандарты Евросоюза.

⁸² Приводимая в фигурных скобках нумерация пунктов соответствует оригинальной нумерации в СТБ EN 13791–2012.

С целью повышения статистической надежности для оценки прочности на сжатие бетона в конструкции целесообразно применять максимально возможное количество выбуренных кернов. Оценка прочности на сжатие бетона в конструкции в определенной области измерений должна быть основана на результатах испытаний не менее трех выбуренных кернов.

{7.3} Оценка характеристической прочности

Характеристическую прочность на сжатие бетона в конструкции оценивают по методу *A* или *B* (см. тему 4). Метод *A* применяется при наличии не менее 15 выбуренных кернов, метод *B* – при наличии от трех до 14 выбуренных кернов.

По методу *A* характеристической прочностью на сжатие бетона для области измерений считается меньшее из двух значений:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - k_2 s \quad (9.3)$$

или

$$f_{ck, is} = f_{is, min} + 4, \quad (9.4)$$

где s – стандартное отклонение результатов испытаний или 2 Н/мм^2 ; принимается большее значение;

k_2 – устанавливается национальными приложениями. Если они отсутствуют, то принимается $k_2 = 1,48$.

Соответствие классу бетона по прочности на сжатие определяют по табл. 9.1 на основе полученной оценки характеристической прочности бетона в конструкции.

Таблица 9.1

Характеристическая прочность на сжатие бетона в конструкции для классов по прочности согласно EN 206-1

Класс по прочности согласно EN 206-1	Отношение прочности на сжатие бетона в конструкции к характеристической прочности на сжатие стандартных образцов	Минимальная характеристическая прочность на сжатие бетона в конструкциях, Н/мм^2	
		$f_{ck, is, cyl}$	$f_{ck, is, cube}$
1	2	3	4
C8/10	0,85	7	9
C12/15	0,85	10	13
C16/20	0,85	14	17

1	2	3	4
C20/25	0,85	17	21
C25/30	0,85	21	26
C30/37	0,85	26	31
C35/45	0,85	30	38
C40/50	0,85	34	43
C45/55	0,85	38	47
C50/60	0,85	43	51
C55/67	0,85	47	57
C60/75	0,85	51	64
C70/85	0,85	60	72
C80/95	0,85	68	81
C90/105	0,85	77	89
C100/115	0,85	85	98

Примечание.

1. Прочность на сжатие бетона в конструкции может быть меньше прочности на сжатие, установленной при испытаниях стандартных образцов из той же партии бетона.

2. Отношение 0,85 является поправочным коэффициентом для γ_s согласно EN 1992-1-1:2004.

По методу *B* характеристической прочностью на сжатие бетона для области измерений считается меньшее из двух значений:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - k \quad (9.5)$$

или

$$f_{ck, is} = f_{is, min} + 4. \quad (9.6)$$

Значение k следует принимать по табл. 9.2 в зависимости от количества результатов испытаний n .

Таблица 9.2

Коэффициент k для малого количества результатов испытаний

n	k
10–14	5
7–9	6
3–6	7

Примечание. Вследствие погрешности, связанной с малым количеством результатов испытаний и необходимостью достижения одинаковой степени надежности, данный метод дает более низкие значения оценки характеристической прочности на сжатие, чем метод, базирующийся на большем количестве результатов испытаний. В случае, если полученные по данному методу значения оценки характеристической прочности на сжатие дают заниженный результат, рекомендуется отобрать большее количество выбуренных кернов или применить комбинированный метод испытаний⁸³ для получения большего количества результатов испытаний. По этой причине данный метод не применяется в спорных случаях, которые касаются показателей качества бетона, базирующихся на результатах стандартных испытаний.

{8} *Оценка характеристической прочности на сжатие бетона в конструкциях косвенными методами испытаний*

{8.1} Основные положения

Испытания косвенными методами являются альтернативой испытаниям выбуренных кернов для оценки прочности на сжатие бетона строительной конструкции в натуральных условиях, а также могут применяться в качестве дополнительных методов при испытаниях ограниченного количества выбуренных кернов. Косвенные методы характеризуются как ограниченно разрушающие (методы локального разрушения) или неразрушающие методы испытаний. После построения градуировочных зависимостей по результатам испытаний выбуренных кернов косвенные методы могут применяться:

- как отдельные самостоятельные методы испытаний;
- в комбинации с другими косвенными методами;
- в комбинации косвенных и прямых методов (испытания выбуренных кернов).

В качестве косвенных методов в СТБ EN 13791 рассматриваются метод отрыва, метод упругого отскока и ультразвуковой импульсный метод.

При испытаниях косвенными методами необходимо применять градуировочную зависимость между результатами испытаний косвенными методами и прочностью на сжатие выбуренных кернов.

⁸³ Сегодня использование комбинированных методов испытаний действующими в Республике Беларусь ТНПА не нормируется.

Для оценки прочности на сжатие бетона в конструкции применяются два альтернативных варианта.

Вариант 1 – прямое сравнение, предписывает построение градуировочной зависимости по результатам совместных испытаний не менее 18 выбуренных кернов косвенным методом и прессовыми испытаниями.

Вариант 2 – калибровка (коррекция) предварительно составленных градуировочных зависимостей косвенных методов посредством испытаний выбуренных кернов для ограниченного диапазона значений прочности на сжатие⁸⁴.

Градуировочная зависимость косвенного метода испытаний должна основываться на не менее чем 18 парах результатов, то есть необходимо получить 18 результатов испытаний выбуренных кернов и 18 результатов испытаний косвенными методами, которые относятся к одной области измерений конструкции. Пара результатов состоит из одного результата испытаний выбуренного керна и одного результата испытаний косвенным методом в одном месте измерения. 18 пар результатов испытаний является минимальным для составления зависимости, предпочтительным является наличие большего количества результатов.

Составление градуировочной зависимости включает следующие этапы:

– определение линейной или нелинейной градуировочной зависимости на основе регрессионного анализа пар результатов. Результат испытаний косвенным методом рассматривается как переменная, а оцениваемое значение прочности на сжатие бетона в конструкции – как функция этой переменной;

⁸⁴ Вариант 2 является наиболее действенным в практике обследований эксплуатируемых и возводимых железобетонных конструкций. Результаты контроля по варианту 1 выглядят более достоверными. Но, поскольку они формально применимы только к той конструкции (или области контроля конструкции), из которой отобрано 18 кернов и имеются данные испытаний этих кернов, теряется смысл применения косвенных методов, ведь оценки прочности уже есть. Поэтому вариант 1 приобретает смысл, если полученную градуировочную зависимость применять за пределами той области, на которой она получена. Таким образом, вариант 1 можно рассматривать как подготовительную фазу к использованию варианта 2, а полученную градуировочную зависимость использовать в качестве базовой.

– расчет стандартной погрешности оцениваемого значения и определение доверительных интервалов для градуировочной зависимости, а также пределов допусков для отдельных результатов;

– определение зависимости как десятичного перцентиля прочности⁸⁵ на сжатие (см. рис. 9.1) – 90 % значений прочности кернов находятся выше искомой градуировочной зависимости.

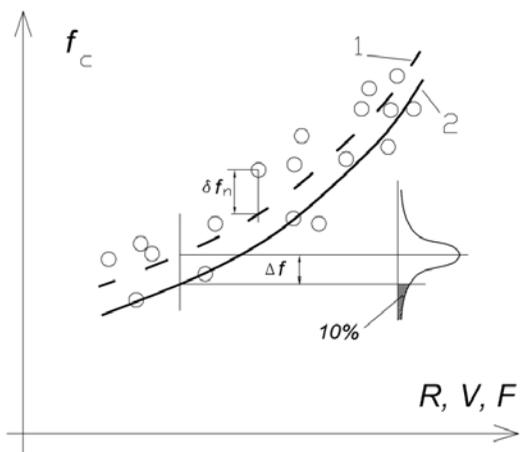


Рис. 9.1. Построение градуировочной зависимости по данным совместных прессовых испытаний и испытаний отобранных кернов ультразвуковым (или иным неразрушающим) методом по СТБ EN 13791–2012:

1 – регрессионная (базовая⁸⁶) кривая; 2 – градуировочная зависимость;

$\delta f_{1..n}$ – разница между отдельным результатом испытания прочности бурового керна и значением прочности по базовой зависимости;

Δf – смещение регрессионной (базовой) кривой

⁸⁵ Полученная градуировочная зависимость дает уровень надежности, при котором ожидается, что 90 % значений прочности на сжатие превышает ее оценку. По данному пункту СТБ EN 13791 градуировочная зависимость будет отличаться от градуировочной зависимости по рассмотренным выше стандартам. Соответственно будут отличаться и оценки прочности бетона: оценки по СТБ EN 13791 будут заниженными, в сравнении с оценками прочности по СТБ 2264, ГОСТ 22690, ГОСТ 17624.

⁸⁶ СТБ EN 13791 допускает использование так называемых базовых градуировочных зависимостей для каждого из указанных косвенных методов испытаний. Формулы базовых зависимостей и их графики приведены в приложениях указанного стандарта.

Оценка прочности на сжатие бетона в конструкции

Зависимость по варианту 1 допускается применять только для бетона и условий, для которых данная зависимость составлена. Она может применяться только для области измерений, к которой относятся результаты испытаний. По результатам измерений и составленной градуировочной зависимости оценивают прочность на сжатие бетона в конструкции $f_{is,I}$.

Для оценки характеристической прочности на сжатие бетона в конструкции действуют следующие условия:

– оценка каждой области измерений должна основываться на измерениях не менее чем 15 мест измерений;

– стандартное отклонение должно соответствовать расчетному значению или равняться 3 Н/мм^2 , при этом принимается большее значение.

Характеристической прочностью на сжатие бетона для области измерений считается наименьшее из двух значений:

$$f_{ck,is} = f_{m(n),is} - 1,48s \quad (9.7)$$

или

$$f_{ck,is} = f_{is,\min} + 4, \quad (9.8)$$

где s – стандартное отклонение результатов испытаний.

Показательной является методика определения характеристической прочности бетона по варианту 2. Предполагается использование ранее построенной градуировочной зависимости либо базовой зависимости. Указанные зависимости корректируются (смещаются) по данным испытаний выбуренных кернов. Данная процедура применяется только для оценки прочности тяжелого бетона, изготовленного из одинаковых составляющих и по одной технологии.

Для коррекции используется не менее девяти пар результатов испытаний (результаты испытаний выбуренных кернов и косвенных испытаний в одном и том же месте измерений). Рассчитывается смещение Δf . Это значение соответствует смещению базовой кривой, после которого полученную зависимость можно использовать в качестве градуировочной для соответствующего косвенного метода испытаний.

Для каждой пары измерений определяют разность δf_i между измеренным значением прочности на сжатие выбуренного керна f_{is} и значением на базовой кривой $f_{I,i}$:

$$\delta f_i = f_{is,i} - f_{I,i}, \quad (9.9)$$

рассчитывают среднее значение $\delta f_{m(n)}$ для n результатов испытаний и стандартное отклонение s для n значений f_{is} ; рассчитывают значение смещения базовой кривой Δf по формуле

$$\Delta f = \delta f_{m(n)} - k_1 s, \quad (9.10)$$

где k_1 зависит от числа пар результатов совместных испытаний и определяется по табл. 9.3.

Таблица 9.3

Количество пар результатов совместных испытаний, n	Коэффициент k_1
9	1,67
10	1,62
11	1,58
12	1,55
13	1,52
14	1,50
≥ 15	1,48

Базовую кривую смещают (рис. 9.2) на значение Δf .

По полученной градуировочной зависимости определяется прочность на сжатие бетона в конструкции $f_{is,I}$ ($f_{is,I}$ является единичным значением прочности бетона конструкции; is в индексной части обозначения указывает на оценку прочности бетона *in situ* (лат.) – по месту, а индекс I – на оценку прочности косвенным методом – механическим или ультразвуковым).

Для оценки характеристической (гарантированной) прочности на сжатие бетона в конструкции действуют следующие условия:

- оценка каждой области испытаний должна базироваться минимум на 15 местах измерений;
- стандартное отклонение s должно соответствовать расчетному значению

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{m(n),is} - f_{i,is})^2}{n-1}} \quad (9.11)$$

или приниматься равным 3 Н/мм^2 , если $s < 3 \text{ МПа}$.

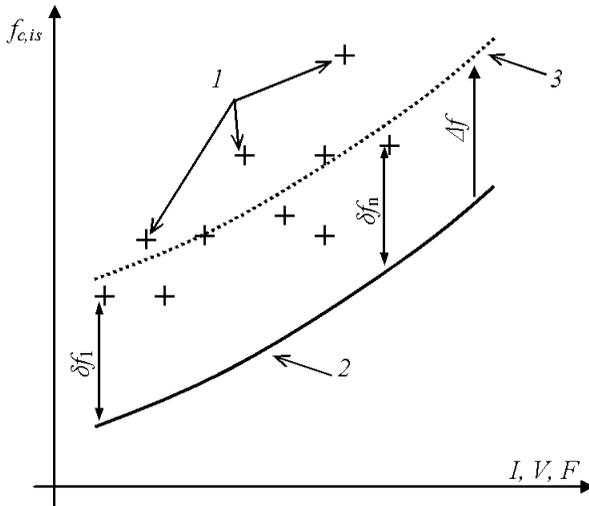


Рис. 9.2. Построение градуировочной зависимости путем коррекции базовой градуировочной зависимости:

1 — точки данных испытаний прочности кернов; 2 — базовая градуировочная зависимость; 3 — градуировочная зависимость косвенного метода испытаний; Δf — смещение базовой кривой

В качестве характеристической прочности бетона области испытаний принимается меньшее из двух следующих значений:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - 1,48s \quad (9.12)$$

или

$$f_{ck, is} = f_{is, min} + 4, \quad (9.13)$$

где $f_{i, is}$ — единичное значение прочности бетона для участка контроля конструкции;

$f_{m(n), is}$ — среднее для n единичных значений прочности;

s — стандартное (среднее квадратическое) отклонение для n единичных значений прочности бетона;

$f_{is, min}$ — наименьшее из n единичных значений прочности бетона;

$f_{ck, is}$ — характеристическая прочность бетона контролируемого участка конструкции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. – Москва: Стройиздат, 1981. – 462 с.
2. Бакиров, М. Б. Феноменологическая методика определения механических свойств корпусных сталей ВВЗР по диаграмме вдавливания шарового индентора / М. Б. Бакиров, В. В. Потапов // Заводская лаборатория. Диагностика металлов. – 2000. – Т. 66. XII 12. – С. 35–44.
3. Неопределенность измерения. Руководство по выражению неопределенности измерения: ГОСТ Р 54500.3–2011. – Часть 3. – Москва, 2012. – 101 с.
4. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения: ГОСТ Р 8.736–2011 ГСИ. – Москва, 2013.
5. Материалы строительные. Диэлькометрический метод измерения влажности: ГОСТ 21718–84. – Москва: Издательство стандартов, 1986. 5 с.
6. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Основные положения: ГОСТ 21778–81. – Москва, 1988. – 8 с.
7. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Контроль точности: ГОСТ 23616–79. – Москва, 1979. – 8 с.
8. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Правила выполнения измерений. Общие положения: ГОСТ 26433.0–85. – Москва: Издательство стандартов, 1986. – 17 с.
9. Прокат арматурный свариваемый периодического профиля классов А500С и В500С для армирования железобетонных конструкций. Технические условия: ГОСТ Р 52544–2006. – Москва: Стандартинформ, 2006. – 20 с.
10. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180–2012. – Введ. 01.07.2013. – Москва, 2013. – 30 с.
11. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля: ГОСТ 22690–88. – Введ. 01.01.91. – Москва, 1991. – 22 с.
12. Бетоны. Правила контроля прочности: ГОСТ 18105–2010. – Введ. 01.09.12. – Москва, 2010. – 16 с.

13. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности: ГОСТ 17624–2012. – Введ. 01.01.2014. – Москва, 2014. – 16 с.

14. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций: ГОСТ 28570–90. – Введ. 01.01.91. – Москва, 1991. – 14 с.

15. Головин, Ю. И. Наноиндентирование как средство комплексной оценки физико-механических свойств материалов в субмикроробъемках / Ю. И. Головин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – № 5. Т. 75. – С. 45–59.

16. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – Москва: Мир, 1989. – 509 с.

17. Ефремова, Н. Ю. Оценка неопределенности в измерениях: практическое пособие / Н. Ю. Ефремова. – Минск: БелГИМ, 2003. – 50 с.

18. Зубков, В. А. Новый метод определения прочности бетона / В. А. Зубков, И. В. Семерков, Е. В. Зубков // Бетон и железобетон. – 1993. – № 1. – С. 11–13.

19. Качанов, В. К. Многоканальный мультипликативный метод акустического контроля крупногабаритных компактных строительных конструкций из бетона / В. К. Качанов, И. В. Соколов // Дефектоскопия. – 2008. – № 12. – С. 23–37.

20. Коревицкая, М. Г. Неразрушающие методы контроля качества железобетонных конструкций / М. Г. Коревицкая. – Москва: Высшая школа, 1993. – 76 с.

21. Лещинский, М. Ю. Испытание бетона: справочное пособие / М. Ю. Лещинский. – Москва: Стройиздат, 1980. – 358 с.

22. Мацулевич, О. В. Применение прибора ИПБ-1Б для неразрушающего контроля прочности бетона / О. В. Мацулевич // Технологии бетонов. – 2014. – № 7. – С. 12–13.

23. Мацулевич, О. В. Повышение достоверности определения физико-механических свойств упругопластических материалов методом динамического индентирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / О. В. Мацулевич. – Минск, 2014. – 21 с.

24. Милов, В. А. Устройства для контроля прочности / В. А. Милов. – Москва: Машиностроение, 1976. – 127 с.

25. Алгоритмы построения градуировочных характеристик средств измерений состава веществ и материалов и оценивание их погрешностей (неопределенностей). Оценивание погрешности (неопределеннос-

ти) линейных градуировочных характеристик при использовании метода наименьших квадратов: Р 50.2.028–2003. – Москва, 2009. – 16 с.

26. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей неопределенности результата измерений: Р 50.2.038–2004. – Москва, 2011. – 7 с.

27. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Метрология. Основные термины и определения: РМГ 29–99. – Москва, 2001.

28. Применение «руководства по выражению неопределенности измерений»: РМГ 43–2001. – Москва, 2003.

29. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения»: РМГ 91–2009. – Москва, 2009. – 18 с.

30. Рудницкий, В. А. Испытание эластомерных материалов методами индентирования / В. А. Рудницкий, А. П. Крень; под ред. П. П. Прохоренко. – Минск: Белорусская наука, 2007. – 227 с.

31. Рюэль, Д. Случайность и хаос / Д. Рюэль. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика». – 2001. – 192 с.

32. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – Москва: Наука, 1977. – 440 с.

33. Снежков, Д. Ю. Мониторинг возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович. – Минск: БНТУ, 2016. – 331 с.

34. Испытания бетона. Неразрушающий контроль прочности: СТБ 2264–2012. – Введ. 01.01.2013. – Минск: Госстандарт, 2013. – 20 с.

35. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Расчет точности: СТБ 1921–2008. – Минск: Госстандарт, 2008. – 13 с.

36. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Функциональные допуски: СТБ 1942–2009. – Минск: Госстандарт, 2009. – 8 с.

37. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Технологические допуски: СТБ 1941–2009. – Минск: Госстандарт, 2009 – 13 с.

38. Система обеспечения точности геометрических показателей в строительстве. Статистически анализ точности: СТБ 1923–2008. – Минск: Госстандарт, 2008. – 15 с.

39. Бетоны конструкционные холодные. Технические условия: СТБ 1544–2005. – Введ. 01.07.2005. – Минск: Минстройархитектуры, 2005. – 36 с.

40. Бетон. Требования, показатели, изготовление и соответствие: СТБ EN 206–2016. – Введ. 01.07.2017. – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2017. – 27 с.

41. Оценка прочности на сжатие бетона в конструкциях и сборных элементах конструкций: СТБ EN 13791–2012. – Введ. 01.07.2012. – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2012. – 26 с.

42. Brozovsky, J. Using of non-destructive methods for strength detection on blended cements and paving blocks / J. Brozovsky, O. Matejka, P. Martinec // Ed. Inderscience Enterprises Ltd., International Journal of Microstructure and Materials Properties (IJMMP). – Vol. 1, Nos ¾. – P. 282–296.

43. Guide to the Expression of Uncertainty in measurement: First edition. – ISO, Geneva, 1993.

44. Shmidt, E. A non-destructive concrete tester / E. Shmidt // Concrete. – 1951, 8. – P. 34.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1

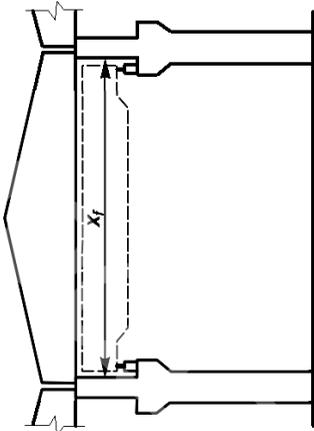
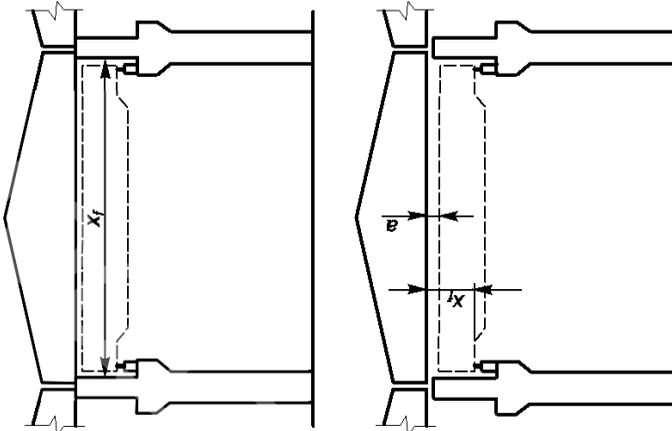
Коэффициент доверия (Стьюдента)

Число измерений	Надежность					
	<i>0,5</i>	<i>0,9</i>	<i>0,95</i>	<i>0,98</i>	<i>0,99</i>	<i>0,999</i>
<i>N</i>						
2	1	6,3	12,7	31,8	63,7	636,6
3	0,82	2,9	4,3	7,0	9,9	31,6
4	0,77	2,4	3,2	4,5	5,8	12,9
5	0,74	2,1	2,8	3,7	4,6	8,6
6	0,73	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	0,72	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	0,71	1,9	2,4	3,0	3,5	5,
9	0,71	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
10	0,70	1,8	2,3	2,8	3,2	4,8
20	0,69	1,7	2,1	2,5	2,8	3,8
>20	0,67	1,6	2,0	2,5	2,8	3,3

Номенклатура функциональных допусков (по СТБ 1942–2011)

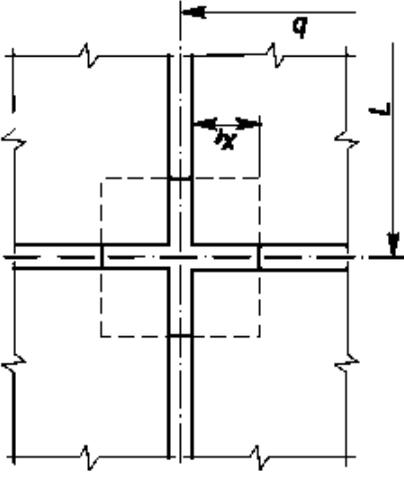
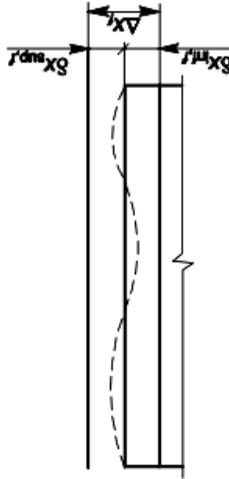
Наименование допуска	Схема	Функциональные требования к конструкции, на основе которых определяется значение допуска
1. Допуски размеров 1.1. Допуски расстояния между элементами или характерными участками.		Эксплуатационные требования Эстетическое восприятие
зазора		Эксплуатационные требования Эстетическое восприятие

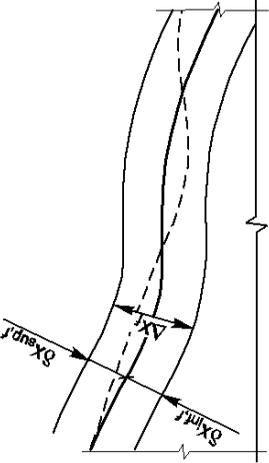
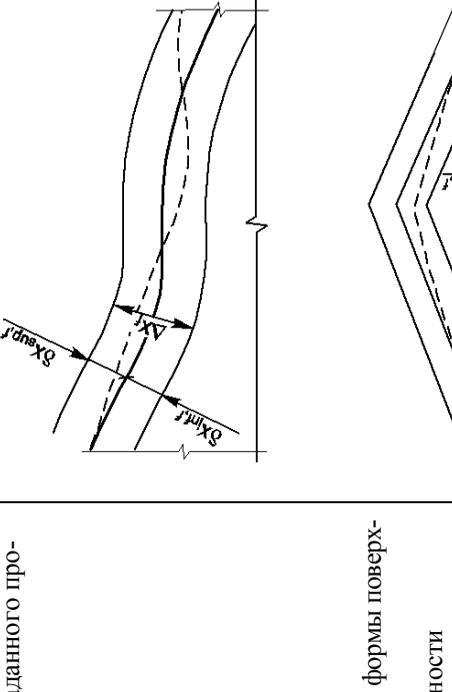
Продолжение табл. Б1

<p>Наименование допуска</p> <p>пролета</p>	<p>Схема</p>  <p>The diagram shows a cross-section of a trapezoidal structure. A dashed line indicates a specific dimension labeled 'xу'.</p>	<p>Функциональные требования к конструкции, на основе которых определяется значение допуска</p> <p>Размещение в пролете элементов с заданными размерами (связи, перегородки, оборудование, встроенная мебель и т. д.), в том числе подъемно-транспортного оборудования</p>
<p>высоты</p>	 <p>The diagram shows a cross-section of a trapezoidal structure. Two dimensions are indicated: 'B' (width) and 'xу' (height/depth).</p>	<p>Размещение по высоте элементов с заданными размерами, в том числе подъемно-транспортного оборудования</p> <p>Эксплуатационные требования</p>

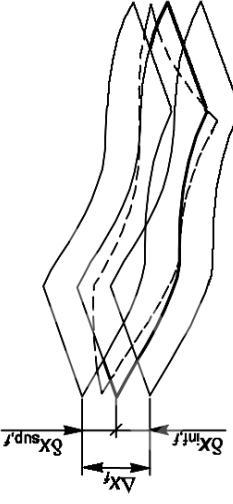
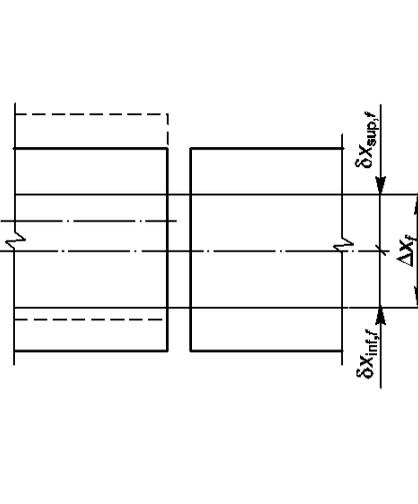
Наименование допуска	Схема	Функциональные требования к конструкции, на основе которых определяется значение допуска
1.2. Допуски размеров опирания элементов длины опирания		Прочность элемента при $x_{min f}$

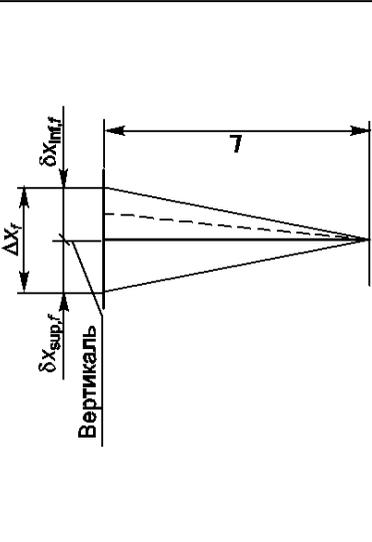
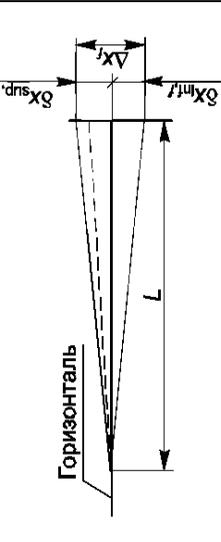
Продолжение табл. Б1

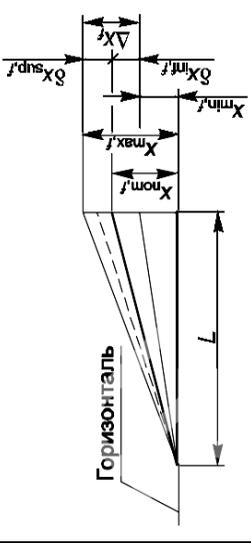
<p>Наименование допуска</p> <p>ширины опирания</p>	<p>Схема</p>  <p>The diagram shows a cross-section of a beam-column joint. A horizontal dimension line labeled 'q' spans the width of the joint. A vertical dimension line labeled 'L' indicates the height of the column. A horizontal dimension line labeled 'x' shows the offset of the column's centerline from the joint's centerline.</p>	<p>Функциональные требования к конструкции, на основе которых определяется значение допуска</p> <p>То же</p>
<p>2. Допуски формы</p> <p>2.1. Допуски формы профиля:</p> <p>прямолнейности</p>	 <p>The diagram shows a longitudinal view of a beam. A dashed line represents the actual profile, and a solid line represents the ideal straight profile. Two straightness tolerance symbols are shown: a vertical arrow labeled 'f_{max}' and a horizontal arrow labeled 'f_{min}', both pointing to the dashed profile line.</p>	<p>Прочность (устойчивость) элемента</p> <p>Эксплуатационные требования</p> <p>Эстетическое восприятие</p>

<p>Наименование допуска формы заданного профиля</p>	<p>Схема</p> 	<p>Функциональные требования к конструкции, на основе которых определяется значение допуска</p>
<p>2.2. Допуск формы поверхности: плоскостности</p>		<p>Прочность (устойчивость) элемента Эксплуатационные требования Эстетическое восприятие</p>

Продолжение табл. Б1

<p>Наименование допуска</p>	<p>Схема</p>	<p>Функциональные требования к конструкции, на основе которых определяется значение допуска</p>
<p>формы заданной по- верхности</p>		<p>То же</p>
<p>3. Допуски положения 3.1. Допуски взаимного положения элементов</p>		<p>Прочность сопрягаемых элементов</p>

Наименование допуска	Схема	Функциональные требования к конструкции, на основе которых определяется значение допуска
3.2 Допуски положения элементов в пространстве: вертикальности	 <p>Вертикаль</p>	Прочность (устойчивость) элемента Эксплуатационные требования Эстетическое восприятие
горизонтальности	 <p>Горизонталь</p>	Эксплуатационные требования Эстетическое восприятие

<p>Наименование допуска заданного наклона</p>	<p>Схема</p> 	<p>Функциональные требования к конструкции, на основе которых определяется значение допуска</p>
		<p>Эксплуатационные требования</p>

Условные обозначения:
 $x_{ном.f}$ – номинальное значение функционального геометрического параметра;
 $x_{мин.f}$ и $x_{макс.f}$ – допустимые пределы значения функционального геометрического параметра;
 $\delta x_{изп.f}$ и $\delta x_{изп.f}$ – предельные отклонения функционального геометрического параметра;
 Δx_f – функциональный допуск.

СТБ 1942–2009
{Приложение Б, справочное}

Значения $t_{\min,f}$ и $t_{\max,f}$ для нормального распределения

Таблица Б1

Допускаемая вероятность появления действительных значений $x_{i,t}$ ниже $x_{\min,f}$ или выше $x_{\max,f}$, %	0,13	0,75	2,0	5,0
$t_{\min,f}$ $t_{\max,f}$	3,0	2,4	2,1	1,6

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В1

Допуски линейных размеров (в миллиметрах)

Интервал номинального размера L	Значение допуска для класса точности								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
До 20 включит.	0,24	0,4	0,6	1,0	1,6	2,4	4	6	10
Св. 20 ” 60 ”	0,30	0,5	0,8	1,2	2,0	3,0	5	8	12
“ 60 ” 120 ”	0,40	0,6	1,0	1,6	2,4	4,0	6	10	16
“ 120 ” 250 ”	0,50	0,8	1,2	2,0	3,0	5,0	8	12	20
“ 250 ” 500 ”	0,60	1,0	1,6	2,4	4,0	6,0	10	16	24
“ 500 ” 1000 ”	0,80	1,2	2,0	3,0	5,0	8,0	12	20	30
“ 1000 ” 1600 ”	1,00	1,6	2,4	4,0	6,0	10,0	16	24	40
“ 1600 ” 2500 ”	1,20	2,0	3,0	5,0	8,0	12,0	20	30	50
“ 2500 ” 4000 ”	1,60	2,4	4,0	6,0	10,0	16,0	24	40	60
“ 4000 ” 8000 ”	2,00	3,0	5,0	8,0	12,0	20,0	30	50	80
“ 8000 ” 16000 ”	2,40	4,0	6,0	10,0	16,0	24,0	40	60	100
“ 16000 ” 25000 ”	3,00	5,0	8,0	12,0	20,0	30,0	50	80	120
“ 25000 ” 40000 ”	4,00	6,0	10,0	16,0	24,0	40,0	60	100	160
“ 40000 ” 60000 ”	5,00	8,0	12,0	20,0	30,0	50,0	80	120	200
Значения K	0,10	0,16	0,25	0,40	0,60	1,0	1,6	2,5	4,0

Таблица В2

Допуски прямолинейности

Интервал номинального размера L			Значение допуска для класса точности					
			1	2	3	4	5	6
Св.	До	1000 включит.	2,0	3	5	8	12	20
	1000 "	1600 "	2,4	4	6	10	16	24
	1600 "	2500 "	3,0	5	8	12	20	30
	2500 "	4000 "	4,0	6	10	16	24	40
	4000 "	8000 "	5,0	8	12	20	30	50
	8000 "	16000 "	6,0	10	16	24	40	60
	16000 "	25000 "	8,0	12	20	30	50	80
	25000 "	40000 "	10,0	16	24	40	60	100
40000 "	60000 "	12,0	20	30	50	80	120	
Значения K			0,25	0,4	0,6	1,0	1,6	2,5

Таблица В3

Допуски перпендикулярности

Интервал номинального размера L			Значение допуска для класса точности								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Св.	До	250 включит.	0,50	0,8	1,2	2,0	3	5	8	12	20
	250 "	500 "	0,60	1,0	1,6	2,4	4	6	10	16	24
	500 "	1000 "	0,80	1,2	2,0	3,0	5	8	12	20	30
	1000 "	1600 "	1,00	1,6	2,4	4,0	6	10	16	24	40
	1600 "	2500 "	1,20	2,0	3,0	5,0	8	12	20	30	50
	2500 "	4000 "	1,60	2,4	4,0	6,0	10	16	24	40	60
Значения K			0,16	0,25	0,40	0,60	1,0	1,6	2,5	4,0	6,0

Таблица В4

Допуски равенства диагоналей

Интервал номинального размера L			Значение допуска для класса точности					
			1	2	3	4	5	6
Св.	До	4000 включ.	4	6	10	16	24	40
	4000 "	8000 "	5	8	12	20	30	50
	8000 "	16000 "	6	10	16	24	40	60
	16000 "	25000 "	8	12	20	30	50	80
	25000 "	40000 "	10	16	24	40	60	100
40000 "	60000 "	12	20	30	50	80	120	
Значения K			0,25	0,4	0,6	1,0	1,6	2,5

Таблица В5

Допуски разбивки точек и осей в плане

Интервал номинального размера L		Значение допуска для класса точности					
		1	2	3	4	5	6
До	2500 включ.	0,6	1,0	1,6	2,4	4	6
Св.	2500 "	1,0	1,6	2,4	4,0	6	10
"	4000 "	1,6	2,4	4,0	6,0	10	16
"	8000 "	2,4	4,0	6,0	10,0	16	24
"	16000 "	4,0	6,0	10,0	16,0	24	40
"	25000 "	6,0	10,0	16,0	24,0	40	60
"	40000 "	10,0	16,0	24,0	40,0	60	100
"	60000 "	16,0	24,0	40,0	60,0	100	160
"	100000 "	24,0	40,0	60,0	100,0	160	-
Значения K		0,25	0,4	0,6	1,0	1,6	2,5

Таблица В6

Допуски передачи точек и осей по вертикали
и створности точек

Интервал номинального размера L		Значение допуска для класса точности					
H	L	1	2	3	4	5	6
До 2500 включит.	До 4000 включит.	-	-	0,6	1,0	1,6	2,4
Св. 2500 "	Св. 4000 "	-	0,6	1,0	1,6	2,4	4,0
" 4000 "	" 8000 "	0,6	1,0	1,6	2,4	4,0	6,0
" 8000 "	" 16000 "	1,0	1,6	2,4	4,0	6,0	10,0
" 16000 "	" 25000 "	1,6	2,4	4,0	6,0	10,0	16,0
" 25000 "	" 40000 "	2,4	4,0	6,0	10,0	16,0	24,0
" 40000 "	" 60000 "	4,0	6,0	10,0	16,0	24,0	40,0
" 60000 "	" 100000 "	6,0	10,0	16,0	24,0	40,0	60,0
" 100000 "	160000 "	10,0	16,0	24,0	40,0	60,0	-
Значения K		0,25	0,4	0,6	1,0	1,6	2,5

Таблица В7

Допуски разбивки и передачи высотных отметок
и перпендикулярности осей

Интервал номинального размера L		Значение допуска для класса точности					
H	L	1	2	3	4	5	6
До 2500 включ.	До 8000 включ.	–	0,6	1,0	1,6	2,4	4
Св. 2500 ” 4000 ”	Св. 8000 ” 16000 ”	0,6	1,0	1,6	2,4	4,0	6
“ 4000 ” 8000 ”	“ 16000 ” 25000 ”	1,0	1,6	2,4	4,0	6,0	10
“ 8000 ” 16000 ”	“ 25000 ” 40000 ”	1,6	2,4	4,0	6,0	10,0	16
“ 16000 ” 25000 ”	“ 40000 ” 60000 ”	2,4	4,0	6,0	10,0	16,0	24
“ 25000 ” 40000 ”	“ 60000 ” 100000 ”	4,0	6,0	10,0	16,0	24,0	40
“ 40000 ” 60000 ”	“ 100000 ” 160000 ”	6,0	10,0	16,0	24,0	40,0	60
“ 60000 ” 100000 ”	–	10,0	16,0	24,0	40,0	60,0	100
“ 100000 ” 160000 ”	–	16,0	24,0	40,0	60,0	100,0	160
Значения K		0,25	0,4	0,6	1,0	1,6	2,5

Таблица В8

Допуски совмещения ориентиров

Интервал номинального размера L		Значение допуска для класса точности					
		1	2	3	4	5	6
До 120 включ.		1,6	2,4	4	6	10	16
Св. 120 ” 250 ”		2,0	3,0	5	8	12	20
“ 250 ” 500 ”		2,4	4,0	6	10	16	24
“ 500 ” 1000 ”		3,0	5,0	8	12	20	30
“ 1000 ” 1600 ”		4,0	6,0	10	16	24	40
“ 1600 ” 2500 ”		5,0	8,0	12	20	30	50
“ 2500 ” 4000 ”		6,0	10,0	16	24	40	60
“ 4000 ” 8000 ”		8,0	12,0	20	30	50	80
“ 8000 ” 16000 ”		10,0	16,0	24	40	60	100
“ 16000 ” 25000 ”		12,0	20,0	30	50	80	120
“ 25000 ” 40000 ”		16,0	24,0	40	60	100	160
“ 40000 ” 60000 ”		20,0	30,0	50	80	120	200
Значения K		0,25	0,4	0,6	1,0	1,6	2,5

Таблица В9

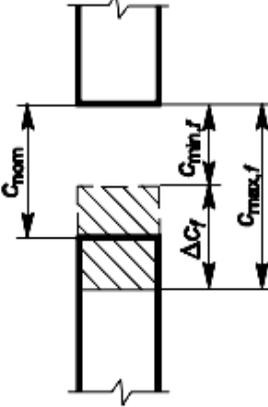
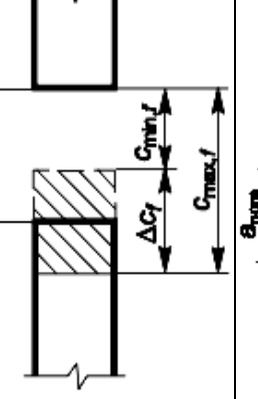
Допуски симметричности установки

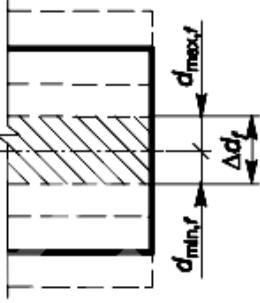
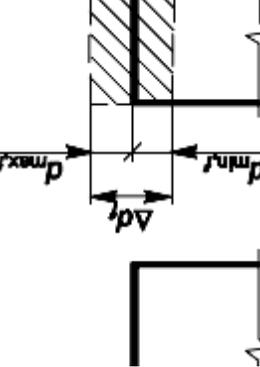
Интервал номинального размера L	Значение допуска для класса точности					
	1	2	3	4	5	6
До 2500 включ.	2,0	3	5	8	12	20
Св. 2500 ” 4000”	2,4	4	6	10	16	24
“ 4000 ” 8000 ”	3,0	5	8	12	20	30
“ 8000 ” 16000 ”	4,0	6	10	16	24	40
“ 16000 ” 25000 ”	5,0	8	12	20	30	50
“ 25000 ” 40000 ”	6,0	10	16	24	40	60
“ 40000 ” 60000 ”	8,0	12	20	30	50	80
Значения K	0,25	0,4	0,6	1,0	1,6	2,5

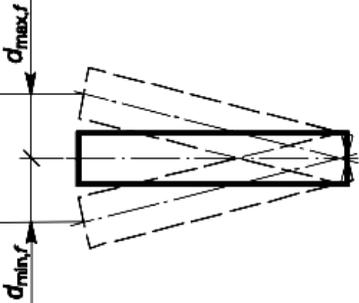
ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г1

Основные виды результирующих параметров (по СТБ 1921–2008)

Наименование результирующего параметра	Схема	Обозначение
1. Зазор между элементами		<p>$S_{ном}$ – номинальное значение зазора; $C_{мин, f}$; $C_{макс, f}$ – допустимые предельные значения зазора; ΔC_f – функциональный допуск зазора</p>
2. Глубина опирания элемента		<p>$a_{ном}$ – номинальное значение глубины опирания; $a_{мин, f}$; $a_{макс, f}$ – допустимые предельные значения глубины опирания; Δa_f – функциональный допуск глубины опирания</p>

Наименование результирующего параметра	Схема	Обозначение
3. Отклонение от соосности элементов		d_{nom} — номинальное значение несоосности; $d_{min,f}$; $d_{max,f}$ — допустимые предельные значения несоосности; Δd_f — функциональный допуск несоосности
4. Несовпадение поверхностей элементов		d_{nom} — номинальное значение несовпадения поверхностей; $d_{min,f}$; $d_{max,f}$ — допустимые предельные значения несовпадения поверхностей; Δd_f — функциональный допуск несовпадения поверхностей

Наименование результирующего параметра	Схема	Обозначение
5. Отклонение от вертикальности		d_{nom} – номинальное значение неvertикальности; $d_{min,f}$; $d_{max,f}$ – допустимые предельные значения неvertикальности; Δd_f – функциональный допуск вертикальности

Примечание. При рассмотрении параметров, характеризующих положение элементов, следует учитывать, что $d_{nom} = 0$, а $d_{min,f}$; $d_{max,f}$ равны по абсолютному значению и определяют предельное отклонение элементов относительно друг друга. Индексы min и max принимают условно для указания направления смещения.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

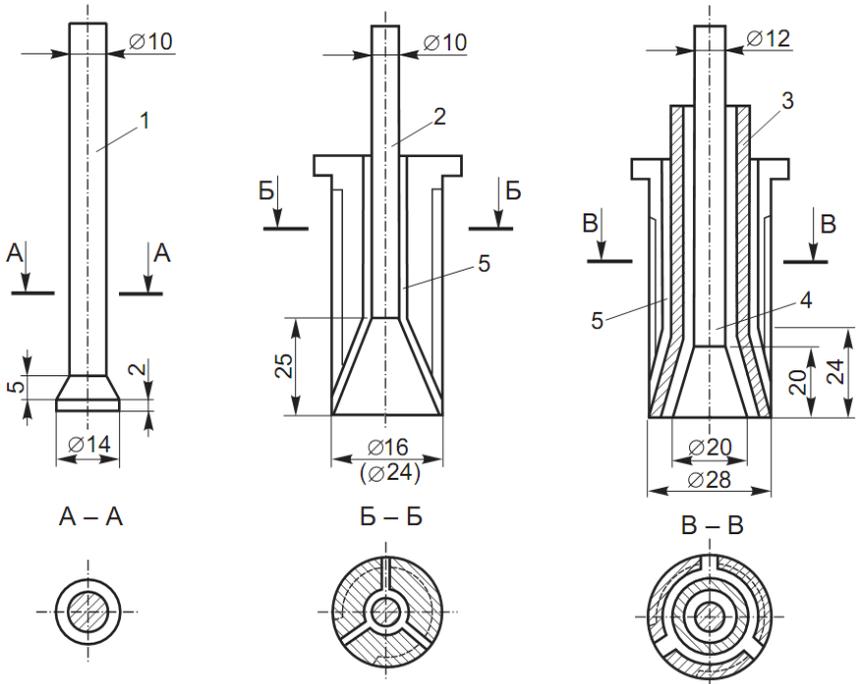


Рис. Д1. Типы анкерных устройств:
 1 – рабочий стержень; 2 – рабочий стержень с разжимным конусом;
 3 – рабочий стержень с полным разжимным конусом;
 4 – опорный стержень; 5 – сегментные рифленые щеки

СТБ 2264–2012
 {Приложение Б, рекомендуемое}

**Методика установления градуировочных зависимостей
 и оценка их погрешностей**

Б.1 Градуировочные зависимости с оценкой их погрешностей устанавливаются в следующей последовательности.

Б.1.1 Уравнение зависимости «косвенная характеристика – прочность» принимают линейным по формуле

$$f_{c,cube,F} = a_0 + a_1 H, \quad (Б1)$$

где $f_{c,cube,F}$ – фактическая кубиковая прочность бетона, МПа;

a_0, a_1 – поправочные коэффициенты;

H – единичное значение косвенной характеристики прочности.

Коэффициенты a_0, a_1 вычисляют по формулам:

$$a_0 = \bar{f}_{c,\phi} - a_1 \bar{H}, \quad (Б2)$$

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})(f_{ci,\phi} - \bar{f}_{c,\phi})}{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}, \quad (Б3)$$

где \bar{H} – среднее значение косвенной характеристики прочности.

$f_{ci,\phi}$ и H_i – единичные значения прочности бетона и косвенной характеристики соответственно для серий образцов (отдельных образцов) по ГОСТ 10180.

Средние значения кубиковой прочности бетона $\bar{f}_{c,\phi}$, определенные по результатам испытаний образцов по ГОСТ 10180, и косвенных характеристик прочности \bar{H} , необходимых для определения этих коэффициентов, вычисляют по формулам:

$$\bar{f}_{c,\phi} = \frac{\sum_{i=1}^N f_{ci,\phi}}{N}, \quad (\text{Б4})$$

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i}{N}, \quad (\text{Б5})$$

где N – количество серий (или отдельных образцов), испытанных для построения градуировочной зависимости.

Б.1.2 После установления градуировочной зависимости по формуле (Б1) производят ее корректировку путем отбраковки единичных результатов испытаний, не удовлетворяющих условию

$$\frac{|f_{ci,H} - f_{ci,\phi}|}{S_T} \leq 2, \quad (\text{Б6})$$

где S_T – остаточное среднее квадратичное отклонение, определяемое по формуле

$$S_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_{ci,\phi} - f_{ci,H})^2}{N - 2}}, \quad (\text{Б7})$$

где $f_{ci,H}$ – прочность бетона по результатам на сжатие в i -й серии образцов (i -м образце), определенная по градуировочной зависимости по формуле

$$f_{ci,H} = a_0 + a_1 H_i. \quad (\text{Б8})$$

После отбраковки единичных результатов испытаний градуировочную зависимость устанавливают заново (по формулам (Б1) – (Б3)) по оставшимся результатам испытаний.

Погрешность определения прочности бетона по установленной градуировочной зависимости вычисляют по формуле (Б7).

Если выполняется условие

$$15 \% \leq \frac{S_T}{f_{c,\phi}} \times 100 \% \geq 12 \%, \quad (\text{Б9})$$

то проведение контроля и оценка прочности по полученной градуировочной зависимости не допускается.

Б.1.3 Проверку градуировочной зависимости производят не реже 1 раза в 12 мес.

Для этого изготавливают не менее шести серий образцов в соответствии с разделом 6.

Для каждой серии образцов (отдельного образца) определяют единичные значения косвенной характеристики H_i и прочности бетона по данным испытаний образцов кубов $f_{ci,\phi}$ (по ГОСТ 10180).

В соответствии с установленной градуировочной зависимостью по полученным косвенным характеристикам определяют прочность бетона. Вычисляют среднее значение косвенных характеристик \overline{H} по формуле

$$\overline{H} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i}{N}. \quad (\text{Б10})$$

Затем делят испытанные серии образцов на две группы.

К первой группе относят серии образцов, единичные значения косвенной характеристики которых не превышают их среднее значение \overline{H} : $H_i < \overline{H}$.

Ко второй группе относят остальные серии образцов, то есть те, у которых $H_i > \overline{H}$.

Градуировочную зависимость допускается использовать при одновременном выполнении следующих условий:

1) значение разности $f_{ci,\phi} - f_{ci,H}$ не должно иметь одинакового знака в пяти из шести испытанных сериях образцов;

2) среднее квадратическое отклонение прочности бетона S_n в испытанных сериях образцов, вычисляемое по формуле

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_{ci,\phi} - \bar{f}_{ci,\phi})^2}{N-1}}, \quad (\text{B11})$$

не должно превышать среднее квадратическое отклонение используемой градуировочной зависимости более, чем в 1,5 раза:

$$S_n < 1,5S_T; \quad (\text{B12})$$

3) значение разности $f_{ci,\phi} - f_{ci,H}$ не должно иметь одинакового знака для серий образцов первой и второй групп.

При невыполнении хотя бы одного из условий, градуировочную зависимость устанавливают повторно.

ГОСТ 17624-2012
{Приложение Б}

**Методика установления градуировочных зависимостей
и оценка их погрешностей**

Б.1 Уравнение градуировочной зависимости (косвенный показатель – прочность) принимают линейным по формуле

$$R = aH + b, \quad (\text{Б1})$$

где R – прочность бетона, МПа;

H – косвенный показатель (время или скорость ультразвука).

Коэффициенты a , b вычисляют по формулам:

$$b = \bar{R}_\Phi - a\bar{H}, \quad (\text{Б2})$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N (R_{i\Phi} - \bar{R}_\Phi)(H_i - \bar{H})}{\sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H})^2}, \quad (\text{Б3})$$

где $R_{c\Phi}$ – прочность бетона на i -м участке, определенная при испытании образцов или методом отрыва со скалыванием, МПа;

H_i – косвенный показатель на i -м участке (образце), определенный в соответствии с требованиями раздела 6.

$$\bar{R}_\Phi = \frac{\sum_{i=1}^N R_{i\Phi}}{N}, \quad (\text{Б4})$$

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i}{N}, \quad (\text{Б5})$$

где N – число участков или отдельных образцов, использованных для построения градуировочной зависимости.

Б.2 Отбраковка результатов испытаний

После построения градуировочной зависимости по формуле (Б1) проводят ее корректировку путем отбрасывания единичных результатов испытаний, не удовлетворяющих условию

$$\frac{|R_{iH} - R_{ci,\Phi}|}{S} \leq 2, \quad (\text{Б6})$$

где S – остаточное среднее квадратичное отклонение, определяемое по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (R_{i\Phi} - R_{iH})^2}{N - 2}}, \quad (\text{Б7})$$

где R_{iH} – прочность бетона на i -м участке, определенная по градуировочной зависимости по формуле

$$R_{iH} = a_j H + b_j, \quad (\text{Б8})$$

где a_j, b_j – коэффициенты для установления градуировочной зависимости.

После отбраковки максимальное и минимальное значение косвенного показателя H_{\min}, H_{\max} и градуировочную зависимость устанавливают вновь по оставшимся результатам испытаний по формулам (Б1) – (Б5).

Б.3 Параметры градуировочной зависимости

Среднеквадратическое отклонение $S_{Т.М.Н}$ построенной градуировочной зависимости определяют по формуле (Б7).

Коэффициент корреляции градуировочной зависимости r определяют по формуле

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(R_{iH} - \bar{R}_H)(R_{i\Phi} - \bar{R}_\Phi)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (R_{iH} - \bar{R}_H)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (R_{i\Phi} - \bar{R}_\Phi)^2}}, \quad (\text{Б9})$$

где $\bar{R}_H = \frac{\sum_{i=1}^N R_{iH}}{N}$.

Б.4 Корректировка градуировочной зависимости

Корректировка установленной градуировочной зависимости с учетом дополнительно получаемых результатов испытаний должна проводиться не реже одного раза в месяц.

При корректировке градуировочной зависимости к существующим результатам испытаний добавляют не менее трех новых результатов. По мере накопления данных для построения градуировочной зависимости результаты предыдущих испытаний, начиная с самых первых, отбраковываются так, чтобы общее число результатов не превышало 20. После отбраковки единичных результатов испытаний, не удовлетворяющих условию (Б6), и добавления новых результатов минимальное и максимальное значения косвенного показателя, градуировочную зависимость и ее параметры устанавливают вновь по формулам (Б1) – (Б9).

Б.5 Условия применения градуировочной зависимости

Применение градуировочной зависимости для определения прочности бетона в соответствии с требованиями настоящего стандарта допускается только для значений косвенного параметра, попадающего в диапазон от H_{\min} до H_{\max} .

Если коэффициент корреляции $r < 0,7$ или среднеквадратическое отклонение градуировочной зависимости $S_{Т.М.Н}/\bar{R} > 0,15$, то контроль и оценка прочности по полученной градуировочной зависимости не допускается.

ПРИЛОЖЕНИЕ И

Таблица И1

Значения F -критерия Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,0$

$k_2 \backslash k_1$	1	2	3	4	5	6	8	12	24	∞
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	161,5	199,5	215,7	224,6	230,2	233,9	238,9	243,9	249,0	254,3
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,37	19,41	19,45	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,84	8,74	8,64	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,04	5,91	5,77	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,82	4,68	4,53	4,36
6	5,99	5,14	4,75	4,53	4,39	4,28	4,15	4,00	3,84	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,73	3,57	3,41	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,44	3,28	3,12	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,23	3,07	2,90	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,07	2,91	2,74	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	2,95	2,79	2,61	2,40
12	4,75	3,88	3,49	3,26	3,11	3,00	2,85	2,69	2,50	2,30
13	4,67	3,80	3,41	3,18	3,02	2,92	2,77	2,60	2,42	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,70	2,53	2,35	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,64	2,48	2,29	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,59	2,42	2,24	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,55	2,38	2,19	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,51	2,34	2,15	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,48	2,31	2,11	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,45	2,28	2,08	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,42	2,25	2,05	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,40	2,23	2,03	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,38	2,20	2,00	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,36	2,18	1,98	1,73
25	4,24	3,38	2,99	2,76	2,60	2,49	2,34	2,16	1,96	1,71
26	4,22	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,32	2,15	1,95	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,30	2,13	1,93	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,44	2,29	2,12	1,91	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,54	2,43	2,28	2,10	1,90	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,27	2,09	1,89	1,62
35	4,12	3,26	2,87	2,64	2,48	2,37	2,22	2,04	1,83	1,57
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,18	2,00	1,79	1,51
45	4,06	3,21	2,81	2,58	2,42	2,31	2,15	1,97	1,76	1,48
50	4,06	3,21	2,81	2,58	2,42	2,31	2,15	1,97	1,76	1,48

Окончание табл. И1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
60	4,00	3,15	2,76	2,52	2,37	2,25	2,10	1,92	1,70	1,39
70	3,98	3,13	2,74	2,50	2,35	2,23	2,07	1,89	1,67	1,36
80	3,96	3,11	2,72	2,49	2,33	2,21	2,06	1,88	1,65	1,31
90	3,95	3,10	2,71	2,47	2,32	2,20	2,04	1,86	1,64	1,28
100	3,94	3,09	2,70	2,46	2,30	2,19	2,03	1,85	1,63	1,26
125	3,92	3,07	2,68	2,44	2,29	2,17	2,01	1,83	1,60	1,21
150	3,90	3,06	2,66	2,43	2,27	2,16	2,00	1,82	1,59	1,18
200	3,89	3,04	2,65	2,42	2,26	2,14	1,98	1,80	1,57	1,14
300	3,87	3,03	2,64	2,41	2,25	2,13	1,97	1,79	1,55	1,10
400	3,86	3,02	2,63	2,40	2,24	2,12	1,96	1,78	1,54	1,07
500	3,86	3,01	2,62	2,39	2,23	2,11	1,96	1,77	1,54	1,06
1000	3,85	3,00	2,61	2,38	2,22	2,10	1,95	1,76	1,53	1,03
∞	3,84	2,99	2,60	2,37	2,21	2,09	1,94	1,75	1,52	1

СТБ EN 13791–2012
{Приложение А, справочное}**Факторы, влияющие на прочность на сжатие
выбуренных кернов****А.1 Общие положения**

Факторы, влияющие на прочность на сжатие выбуренных кернов, различаются по их происхождению, зависят от качества бетона или представляют собой переменную величину, связанную с погрешностями испытаний. На прочность выбуренных кернов влияет процесс последующего ухода за бетоном в конструкции и возраст бетона в момент отбора образцов. Некоторые факторы могут учитываться при оценке результатов испытаний. Учет других факторов при известных обстоятельствах может быть сбалансирован, при этом некоторые факторы могут не учитываться.

А.2 Свойства бетона**А.2.1 Влагосодержание**

Влагосодержание в выбуренных кернах влияет на измеренную прочность на сжатие. Прочность на сжатие водонасыщенного выбуренного керна на 10–15 % ниже, чем прочность на сжатие выбуренного керна, высушенного на воздухе; в большинстве случаев это значение составляет от 8 % до 12 %.

А.2.2 Пористость

С увеличением пористости прочность на сжатие уменьшается. Увеличение пористости на 1 % снижает прочность на сжатие на 5–8 %.

А.2.3 Направление приложения испытательной нагрузки относительно направления укладки бетона

Измеренная прочность на сжатие вертикально выбуренного керна в направлении бетонирования, в зависимости от стабильности свежеприготовленного бетона, может быть больше прочности на сжатие горизонтально выбуренного керна из этого же бетона. Разница составляет обычно от 0 % до 8 %.

А.2.4 Пустоты

Пустоты в выбуренных кернах могут быть результатом различных причин. К ним относятся, например, скопления воды под пла-

стинчатými зернами крупного заполнителя или горизонтальной арматурой, местное расслоение смеси. Надежность оценки прочности на сжатие таких выбуренных кернов и их способность отражать общую прочность на сжатие бетона в конструкции должны быть проанализированы отдельно.

А.3 Влияющие факторы

А.3.1 Диаметр выбуренного керна

Диаметр выбуренного керна влияет на измеренную прочность на сжатие и размах вариации значений. Прочность на сжатие выбуренного керна, отобранного в горизонтальном направлении, диаметр и высота которого равны 100 мм ($l/d = 1$), соответствует прочности на сжатие стандартных кубических образцов со стороной 150 мм. Для выбуренных кернов диаметром менее 100 мм и $l/d = 1$ размах вариации значений прочности на сжатие, как правило, больше. Поэтому при испытаниях выбуренных кернов диаметром 50 мм целесообразно применять в 3 раза больше выбуренных кернов, чем при испытаниях выбуренных кернов диаметром 100 мм; для выбуренных кернов диаметром от 100 до 50 мм необходимо применять линейную интерполяцию.

Размах вариации значений измеренной прочности на сжатие увеличивается с уменьшением отношения диаметра к максимальному размеру зерен.

При испытаниях выбуренных кернов диаметром менее 50 мм (микрочернов) требуется применение дополнительных мер, не описанных в настоящем стандарте.

А.3.2 Отношение длина/диаметр

Отношение длина/диаметр влияет на измеренную прочность на сжатие. Прочность на сжатие уменьшается при отношении $l/d > 1$ и увеличивается при $l/d < 1$. Данный фактор обусловлен в основном ограничением деформаций испытываемого образца пластинами испытательной машины.

А.3.3 Плоскостность торцевых поверхностей

Отклонения от плоскостности торцевых поверхностей снижают измеряемую прочность на сжатие. Допустимое отклонение от плоскостности должно быть таким, как для стандартных испытываемых образцов, в соответствии с требованиями EN 12390-1.

А.3.4 Выравнивающий слой на торцевых поверхностях

Выравнивающий слой с низкой прочностью снижает прочность на сжатие образца. Тонкие слои высокопрочного раствора не ока-

зывают существенного влияния на прочность на сжатие. Рекомендуется торцевые поверхности выравнивать шлифованием.

А.3.5 Воздействие процесса бурения

Буровые работы для бетона в раннем возрасте или для бетона с низкой прочностью могут оказывать негативное воздействие, которое в обычных условиях выявить невозможно. Выбуренный керн в виде цилиндра может иметь невысокую прочность на сжатие, поскольку поверхность выбуренного керна содержит отделившиеся части зерен заполнителя, которые удерживаются только посредством адгезии матрицы в поверхности. Такие частицы незначительно влияют на прочность на сжатие выбуренного керна.

А.3.6 Арматура

Выбуренные керны, применяемые для измерения прочности на сжатие бетона, не должны содержать стержней арматуры. Если этого невозможно избежать, следует учитывать, что измеренная прочность на сжатие выбуренного керна с содержанием арматуры, кроме расположенной в направлении продольной оси, занижена. Выбуренные керны с арматурой, расположенной по продольной оси или вблизи ее, не допускаются для испытаний по прочности на сжатие.

Учебное издание

СНЕЖКОВ Дмитрий Юрьевич
ЛЕОНОВИЧ Сергей Николаевич

**ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ
И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-70 02 01
«Промышленное и гражданское строительство»

Редактор *Е. С. Кочерго*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 30.10.2019. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 16,10. Уч.-изд. л. 12,59. Тираж 200. Заказ 26.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.