

Д.Ю. Снежков  
С.Н. Леонович

МОНИТОРИНГ ВОЗВОДИМЫХ И ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ

Минск  
БНТУ  
2016

УДК 624.012.4:620.179:005.584.1

**Снежков, Д.Ю.** Мониторинг возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович. – Минск: БНТУ, 2016. – 331 с. – ISBN 979-985-550-783-4.

В монографии рассмотрен широкий круг вопросов, касающихся определения прочностных характеристик бетона неразрушающими методами. Изложены физические принципы основных методов неразрушающих испытаний бетона в конструкциях, рассмотрены перспективные направления совершенствования неразрушающих методов. Большое внимание уделено вопросам развития ультразвуковых методов испытания бетона. Приведен обширный экспериментальный материал лабораторных испытаний и результаты натурных испытаний на объектах строительства, которые рассматриваются с позиций действующих нормативов и вводимых норм Евросоюза. Представлены результаты долговременного наблюдения деформаций несущего каркаса высотного здания, полученные с использованием автоматизированной системы мониторинга.

Книга предназначена для инженерно-технических работников строительных лабораторий, проектировщиков, специалистов, занимающихся конструированием и использованием приборов неразрушающего контроля бетона. А также будет полезна студентам, магистрантам, аспирантам и преподавателям высших учебных заведений, занимающихся вопросами контроля качества в строительстве.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом  
Белорусского национального технического университета  
(протокол № 1 от 22.01.2016 г.)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *В.В. Тур*  
(зав. кафедрой технологий бетона и строительных материалов  
Брестского государственного технического университета);  
доктор технических наук *А.П. Крень*  
(зав. лабораторией Института прикладной физики НАН Беларуси)

ISBN 979-985-550-783-4

© Снежков Д.Ю., Леонович С.Н., 2016  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>Глава 1 КРАТКИЙ ОБЗОР РАЗВИТИЯ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ БЕТОНА В КОНСТРУКЦИЯХ</b> .....	10
<b>Глава 2 МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕТОНА</b> .....	17
2.1 Элементы механики контактного взаимодействия.....	19
2.2 Склерометрические методы испытания бетона.....	26
2.2.1 Методы пластической деформации.....	26
2.2.2 Метод упругого отскока.....	28
2.2.3 Метод ударного импульса.....	45
2.2.4 Кинетическое индентирование.....	53
2.2.5 Динамическое индентирование бетона.....	57
<b>Глава 3 АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ</b> .....	66
3.1 Методы свободных колебаний (natural oscillation frequencies (NOF)).....	70
3.2 Методы частотного анализа акустических сигналов Фурье-спектр.....	82
3.3 Вейвлет преобразование (wavelet transform).....	85
3.4 Виброакустический метод.....	87
3.5 Резонансный многоканальный мультипликативный метод.....	90
<b>Глава 4 УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕТОНА</b> .....	97
4.1 Ультразвуковой импульсный метод: методическая основа.....	97
4.2 Прогнозирование прочности бетона в проектном возрасте по данным измерения скорости ультразвука...	104
4.3 Ультразвуковой импульсный метод: техническая реализация.....	105
4.4 Конструктивные схемы ЭАП.....	108
4.5 Ультразвуковой импульсный метод: метрологический аспект.....	116

4.6	Экспериментальное сопоставление способов регистрации времени распространения ультразвукового импульса .....	121
4.7	Акустическая нелинейность бетона .....	127
<b>Глава 5 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ УПРУГИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В БЕТОННОМ МАССИВЕ.....</b>		
5.1	КЭ модель для исследования распределения упругих колебаний в однородном бетонном массиве ....	147
5.2	Анализ данных моделирования упругих волн возбуждаемых нормальным вектором силы.....	150
5.3	Анализ данных моделирования упругих волн возбуждаемых тангенциальным вектором силы.....	161
5.4	Моделирование упругой волны в условиях прохождения поверхностной трещины.....	167
5.5	Моделирования распространения волны акустического импульса в бетонном массиве с армированием .....	178
<b>Глава 6 НОРМИРОВАНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ БЕТОНА В КОНСТРУКЦИЯХ</b>		
6.1	Статистика испытаний бетона монолитных конструкций .....	191
6.2	Основные различия методик действующих ТНПА .....	198
6.3	Измерение скорости ультразвукового импульса на основе методики профилирования .....	206
<b>Глава 7 МУЛЬТИВОЛНОВОЙ КОНТРОЛЬ БЕТОНА .....</b>		
7.1	Мультиволновой контроль бетона в конструкциях.....	217
7.2	Экспериментальное исследование процесса распространения поверхностной волны ультразвукового импульса в бетонных изделиях, на больших базах прозвучивания .....	219
7.3	Определение динамического коэффициента Пуассона..	228
7.4	Методика определения скорости распространения импульса поверхностной волны в крупноразмерных бетонных и железобетонных конструкциях .....	232
7.5	Анализ данных испытаний.....	238
<b>Глава 8 КОМБИНИРОВАНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ БЕТОНА .....</b>		
8.1	Аддитивный алгоритм комбинирования .....	241



8.2 Экстраполирующий (мультипликативный) алгоритм комбинирования .....	262
<b>Глава 9 ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ .....</b>	<b>266</b>
9.1 Технические средства системы мониторинга «АККЕ» ..	272
9.2 Методика обработки данных мониторинга .....	278
9.3 Технические результаты мониторинга.....	284
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>293</b>
Приложение А.....	306
Приложение Б .....	307
Приложение В .....	311
Приложение Г .....	314
Приложение Д.....	320
Приложение Е .....	329

## ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение проектного срока безаварийной эксплуатации монолитных конструкций и сооружений, и возможность его продления в значительной мере определяется качеством выполнения бетонных работ при их возведении, а также достоверностью информации о текущем состоянии конструкций, особенно в случаях экстремальных воздействий или по истечении значительного эксплуатационного периода. Возрастающую роль в качестве основы производственно-технологического контроля приобретают в настоящее время оперативные неразрушающие методы определения прочностных показателей бетона.

Вводимые в действие новые нормативы [12, 33, 87] рассматривают неразрушающие методы определения прочности бетона в конструкциях в качестве основы системы обеспечения качества бетонных работ. Речь идет о сплошном технологическом контроле изготавливаемых железобетонных изделий. Сильной стороной неразрушающих методов испытаний является возможность их многократного применения на одном и том же изделии. Они могут использоваться как на ранних стадиях его твердения - при оценке распалубочной прочности [28, 44, 51, 54, 107, 116] и в процессе выдерживания, обеспечивая сплошной контроль строительной продукции, так и при выполнении мониторинга прочностных параметров бетона наиболее ответственных монолитных конструкций, до достижения ими проектных значений [50]. Не менее важна роль неразрушающего контроля при обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений, особенно эксплуатируемых в условиях динамических нагрузок, а также при выполнении работ связанных с реконструкцией.

Несмотря на постоянно расширяющийся перечень приборных средств неразрушающего контроля бетона, степень их применения в производственных условиях строительства остается низкой. Одной из причин является невысокая степень доверия к получаемым неразрушающими методами оценкам прочности бетона. Не способствует доверию и наблюдаемые различия оценок, полученных разными неразрушающими методами испытаний [36, 41, 83, 85, 101].

В задачах оценки состояния бетона возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций можно выделить два взаимосвя-

занных аспекта: *метрологический*, включающий в себя вопросы выбора физических принципов контроля прочностных параметров бетона, их технической реализации; и *нормативный* аспект, включающий вопросы методик проведения испытаний и выбора оценочных критериев. Последние полтора - два десятилетия на мировом рынке наблюдается стабильное расширение номенклатуры приборов неразрушающих испытаний бетона по «традиционным» стандартизированным методикам определения его прочностных показателей, обладающих улучшенными метрологическими и пользовательскими качествами, – с элементами автоматизированной обработки данных и их визуализации. Появились приборы реализующие новые методы испытаний: низкочастотной ультразвуковой томографии, акустической эмиссии, спектральных акустических методов. Появились предложения приборной техники нового направления диагностики – долговременного автоматизированного мониторинга состояния несущих конструкций зданий и сооружений. Но, несмотря на это, заметного качественного прогресса в улучшении точности и достоверности оценки прочностных показателей бетона неразрушающими методами возводимых и эксплуатируемых конструкций не произошло. Основной причиной этого является, на наш взгляд, отставание методического и нормативного обеспечения контроля от потенциальных возможностей новой приборной техники.

Несущая способность конструкций при их совместной работе, определяется не только прочностью бетона, но и его упругими свойствами [3, 53]. Параметры упругости бетона в существующей системе расчетов железобетонных конструкций принимаются исходя из класса бетона по прочности, что вносит дополнительный фактор неопределенности в расчеты. В настоящее время этот вопрос остается вне поля зрения конструкторов и технологов, чему способствует практически полное отсутствие его нормативной регламентации, а также отсутствие адаптированных к построечным условиям методик определения упругих модулей бетона.

Специфической проблемой в практике неразрушающего контроля железобетонных конструкций в Республике Беларусь является несогласованность действующих в республике нормативов и вводимых в действие нормативов стран Евросоюза, регламентирующих методики и критерии отнесения бетона контролируемой конструк-

ции к тому или иному классу по прочности. На основе большого объема данных натуральных испытаний монолитных конструкций в работе выполнен анализ введенного в 2009 году СТБ EN 13791-2012 [87] и его сопоставление с действующими СНБ 5.03.01-02 [9], СТБ 1544-2005 и СТБ 2264-2012 [33]. Результаты работы были использованы в разработке проекта стандарта предприятия «Контроль неразрушающий. Методика выполнения измерений. Контроль прочности бетона в строящихся и эксплуатируемых зданиях и сооружениях ультразвуковым методом».

Железобетон не теряет позиций основного конструкционного материала и в высотном строительстве. Спецификой высотного строительства является использование облегченных железобетонных конструкций из высокопрочных бетонов и конструкций с использованием предварительного напряжения арматуры, что дополнительно ужесточает требования к прочностным показателям используемого бетона. Важным и обязательным условием обеспечения качества высотного строительства является его научно-техническое сопровождение, основной компонент которого - мониторинг состояния несущих конструкций здания в процессе строительства и в период эксплуатации. К настоящему времени в Республике Беларусь уже накоплен некоторый опыт научного сопровождения строительства уникальных и высотных объектов. Такие работы выполнялись при строительстве Национальной библиотеки Беларуси, спортивного комплекса "Минск-Арена" [79, 82, 114], высотных зданий на проспекте Победителей 9 в г.Минске, на строительной площадке Бушерской атомной станции (Исламская Республика Иран) и БелАЭС. Результаты этих работ нашли отражение в предлагаемой книге.

Выполненные авторами работы, включая натурные испытания бетона в рамках мониторинга монолитных бетонных изделий строительных объектов г. Минска в период с 2005 г. по 2015 г., позволили накопить обширный фактический материал испытаний бетона различными неразрушающими методами и, на основе его анализа, сформулировать ряд рекомендаций для оперативного технологического контроля состояния монолитных изделий на различных стадиях их твердения.

Представлен обзор и анализ перспективных методик неразрушающего определения прочностных показателей бетона в конст-

рукциях. Рассматриваются критерии соответствия бетона конструк-  
ций классу по прочности. Даны рекомендации для совершенствована  
нормативной базы неразрушающих испытаний бетона в конст-  
рукциях.

## ГЛАВА 1

### КРАТКИЙ ОБЗОР РАЗВИТИЯ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ БЕТОНА В КОНСТРУКЦИЯХ

Практически все новые зарубежные и отечественные разработки неразрушающих методов контроля бетона и приборных средств концентрируются в настоящее время вокруг следующих направлений:

- развитие «традиционных» стандартизированных методов испытаний на основе учета большего числа косвенных параметров, объединения отдельных методов в комплекс, применения специальных алгоритмов обработки данных [1, 22, 89, 103, 106, 117];

- использование стандартизированных методов и приборных средств испытаний бетона в специфических условиях [95, 100, 102, 104, 105];

- использование нетрадиционных способов реализации «стандартных» методов контроля, в частности, - бесконтактная инициация ультразвуковых зондирующих импульсов в массиве бетона;

- бесконтактная дистанционная регистрация параметров акустических волн в бетоне, в том числе волн акустической эмиссии в бетоне с использованием методов оптической (лазерной) интерферометрии [131];

- контроль напряженно-деформированного состояния и развития дефектов крупногабаритных железобетонных конструкций методом акустической эмиссии [2, 55, 62, 66, 67, 77, 95, 124];

- контроль дефектов бетонного массива крупногабаритных железобетонных конструкций акустическими методами, включая ультразвуковую томографию (дефектоскопию) и методы свободных колебаний [35, 118, 123, 126, 127];

- определение физико-механических и микро- и макроструктурных свойств бетона на основе учета параметров его акустической нелинейности [115, 128, 129, 132, 133-135];

- контроль свойств бетона и железобетона, его структурной неоднородности, степени коррозии на основе регистрации электрических характеристик в широком диапазоне частотного спектра,

включая радиоволновые методы томографии (дефектоскопии) строительных конструкций [112];

- обследование зданий и сооружений с использованием тепловизионных систем, в том числе и для обнаружения и оценки дефектов железобетонных конструкций;

- разработка систем автоматизированного мониторинга инженерных (несущих) конструкций (СМИК) эксплуатируемых зданий и сооружений в режиме реального времени.

Поток публикаций в западных источниках о развитии неразрушающих методов контроля бетонных и железобетонных конструкций удобно анализировать по материалам Internet-источников, посвященных вопросам неразрушающих испытаний в различных областях промышленности и представляющих возможность автоматического тематического поиска. На рис. 1.1 приведены данные по количеству публикаций по вопросам неразрушающих испытаний бетона и железобетонных конструкций по годам за период с 2000 г. по 2014 г.

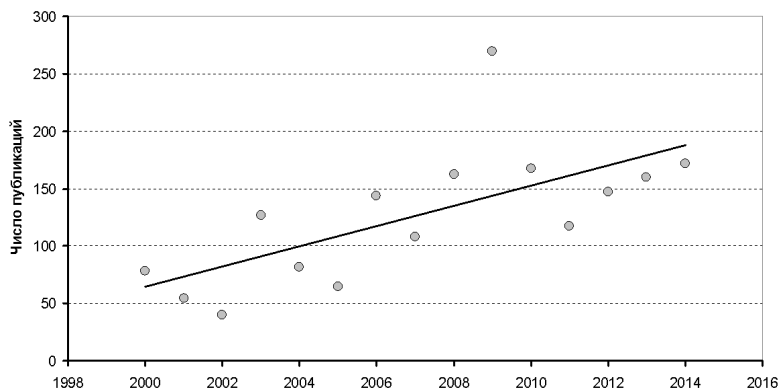


Рис. 1.1 – Количество публикаций по годам  
(по материалам сайта <http://www.ndt.net>)

Отчетливо видна тенденция роста публикаций по годам, при этом можно заметить и некоторую ее 3-х годовичную периодичность.

Таблица 1.1 – Количество публикаций по вопросам неразрушающих испытаний бетона и железобетона (по материалам сайта <http://www.ndt.net>)

Методы испытаний	Количество публикаций по годам														
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Контроль коррозии; электрохим. методы	3	1	0	4	1	1	3	3	5	18	6	5	5	6	5
Ультразвуковая дефектоскопия, томография	4	3	3	13	9	4	16	15	20	20	21	11	19	13	16
Методы свободн. колебаний; резонансные методы	0	0	1	1	2	1	0	0	2	7	4	2	2	7	5
Методы акустической эмиссии	6	4	9	10	5	16	14	7	20	30	22	23	25	21	21
Лазерная спектроскопия	0	0	0	2	1	0	3	0	0	0	0	0	3	0	1
Автоматизация испытаний; автоматизир. мониторинг	2	2	0	1	5	2	10	4	6	9	5	4	7	19	7
Инфракрасная термография	4	3	2	9	9	2	7	11	13	22	13	15	18	5	10
Мех. методы: отрыва	1	0	0	3	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1
Кондуктометрические, диэлектрические	0	0	1	3	0	0	0	1	1	3	0	0	0	0	2
Импакт-эхо	4	5	2	9	2	8	8	2	8	20	6	5	6	8	5
Склерометрические: Impraekt-Hammer	1	0	0	3	2	0	0	3	3	4	6	3	2	1	5
Ультразвуковые прохождение	17	15	6	23	19	14	34	21	33	64	37	24	25	22	34
Интерферометрические, комбинированные методы	2	3	1	2	1	0	5	2	2	7	0	0	1	2	4
Другие методы; обзорные статьи	13	7	3	11	6	2	12	12	24	25	20	10	12	18	21
Радиографические; рентген ЯМР, гамма, томография	9	4	6	9	12	5	11	10	6	5	7	7	8	9	9
Радиоволновые, электромагнитные	12	7	6	19	5	7	17	15	16	29	18	6	11	13	22
Оптические	0	0	0	5	3	3	3	2	2	6	2	1	3	16	4
Обучение, сертификация	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1	3	0	1	3	1
Всего:	78	54	40	127	82	65	144	108	162	269	167	117	147	160	172



Таблица 1.2 – Количество публикаций по вопросам неразрушающих испытаний бетона и железобетона ультразвуковыми методами прохождения (по материалам сайта <http://www.ndt.net>)

Ультразвуковые методы испытаний бетона и железобетона	Количество публикаций по годам														
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Ультразвуковой импульсный метод	7	12	5	13	6	9	12	13	18	23	21	18	17	12	23
Определение характеристик акустической нелинейности бетона ; спектральные методы	2	1	1	5	2	1	8	3	7	14	8	3	3	7	4
Моделирование процессов прохождения акустических волн в бетоне	0	0	0	3	5	2	9	2	3	7	5	2	2	2	1
Мультиволновые испытания: прохождение волн различных типов через бетон	3	2	0	2	5	2	5	0	5	14	1	0	1	0	4
Определение упругих модулей, деформации и анизотропии бетона	2	0	0	0	0	0	0	3	0	5	1	0	2	1	1
Обнаружение и оценка параметров трещин	3	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1

В таблице 1.1 приведены развернутые данные о количестве статей, посвященных отдельным темам неразрушающих испытаний бетона. «Лидирующие» позиции за весь обозреваемый период устойчиво удерживают ультразвуковые методы прохождения, - им посвящено порядка 20% публикаций. Вторую позицию делят между собой метод акустической эмиссии, методы акустической томографии (дефектоскопии) и группа методов, в основе которых лежит взаимодействие бетона и железобетона с электромагнитными полями.

Стабильно большое количество публикаций посвящено вопросам использования методов термографии в разных практических аспектах, начиная от вопросов тепловой реабилитации зданий, заканчивая экзотическими способами инфракрасной визуализации подповерхностных дефектов и участков неоднородности бетона железобетонных конструкций. Такое же количество публикаций посвящено радиографическим методам, включая метод ядерно-магнитно-резонансной (ЯМР) томографии.

В таблице 1.2 приведены данные по различным направлениям ультразвуковых методов прохождения. Наибольшее количество публикаций посвящено вопросам использования ультразвукового импульсного метода, либо отдельно - в специфических условиях использования, либо в совокупности с другими методами испытаний. Эпизодически появляются публикации посвященные вопросам обнаружения поверхностных трещин и оценки их параметров. Регулярно появляются статьи по вопросам использования спектральных методов обработки акустических сигналов. Это касается методов свободных колебаний, к которым можно отнести и приобретший популярность Impact-Echo метод, и ультразвукового метода прохождения.

Если рассматривать данные о количестве публикаций в относительных показателях по каждому году (рис. 1.2), то можно констатировать отсутствие заметных количественных скачков.

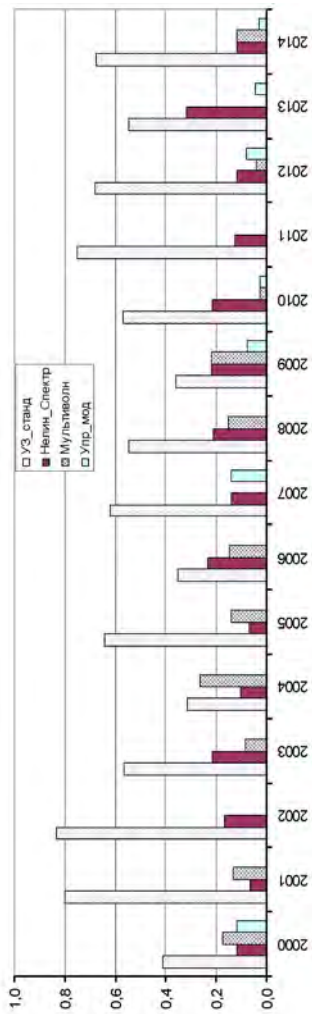
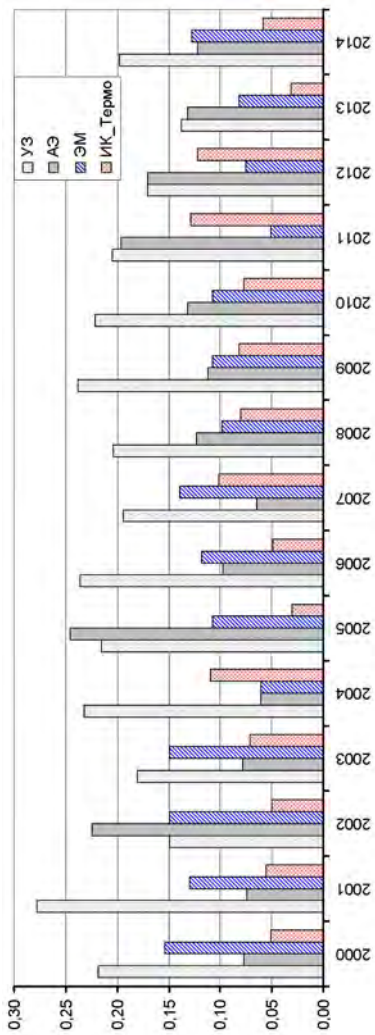


Рис. 1.2 – Гистограммы относительного количества публикаций

С 2003 года регулярно появляются публикации по вопросам моделирования волновых акустических процессов, в том числе и процессов распространения ультразвуковых волн в среде бетона. Имеются отдельные публикации на тему акустоэмиссионного метода определения эксплуатационного ресурса строительных конструкций и сооружений.

Количество публикации в развитие механических методов испытаний бетона небольшое, но стабильное. Заметим, что одну из лидирующих позицию здесь сохраняют за собой исследователи России [4, 5, 56] и Беларуси [57, 58, 75].

Развитием методов контроля бетона на основе новых физических принципов в последние 7-10 лет можно рассматривать представленные в 1996-2015 гг. данные по методу, использующему эффект механоэлектрических преобразований [96-99], и его применения для контроля прочностных показателей бетона и процесса трещинообразования в бетоне [96]. В указанных работах экспериментально подтвержден механизм механоэлектрических преобразований при ударном возбуждении композиционных материалов на основе цементного вяжущего. Показано, что процесс механоэлектрических преобразований протекает в два этапа: первый – электризация материала в точке удара и второй – механоэлектрические преобразования на границе раздела матрицы и заполнителя.

Следует отметить достаточно стабильное, хотя и небольшое, количество публикации в развитие теоретических концепций разрушения бетона на основе микромеханических моделей бетона, а также публикаций, посвященных нелинейным акустическим эффектам в бетоне [129, 132, 133], если до 2004-2005 гг. такие публикации были единичными [15, 66], то начиная с 2006 года их число возросло в несколько раз. Одной из причин этого можно считать, по-видимому, достаточно высокий уровень теоретических предпосылок разработки нелинейных акустических методов.

## ГЛАВА 2

### МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕТОНА

Неразрушающие методы контроля прочностных показателей бетона в конструкциях (*in situ*) обычно классифицируются как механические и физические. К механическим методам относятся методы, косвенными параметрами которых являются сила, перемещение, время, и их производные. При этом, как правило, испытание сопровождается разного масштаба разрушением поверхностной зоны воздействия. К таким методам можно отнести группу методов локального разрушения бетона и группу склерометрических методов, основанных на взаимодействии твердого индентора (ударника) с поверхностью контролируемого изделия (рис. 2.1). Присутствие в данной классификации метода испытания образцов бетона указывает не на его неразрушающий характер, а на его поддержку всех остальных методов испытаний.

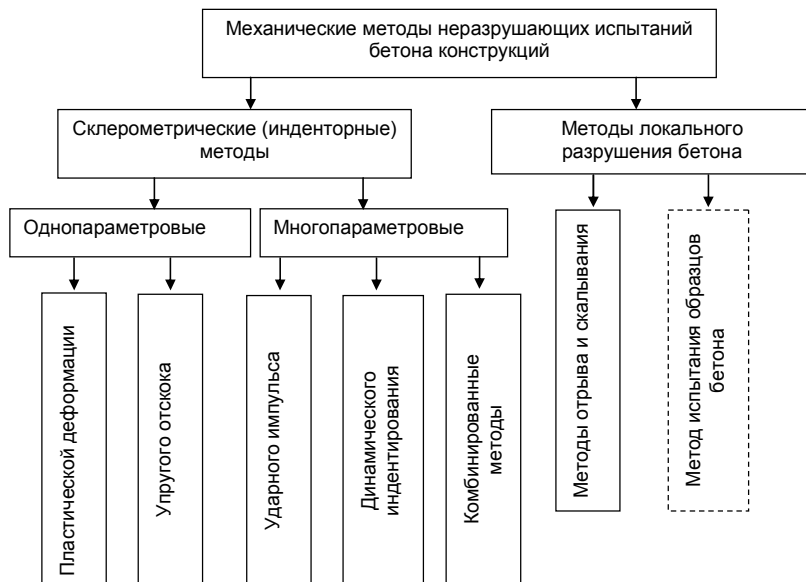


Рис. 2.1 – Классификация механических методов неразрушающих испытаний бетона конструкций

Указанная классификация ориентирована на физические принципы измерения. Если же принимать во внимание селективность методов по отношению к контролируемым прочностным параметрам бетона, то можно предложить классификацию по энергии воздействия на контролируемую зону. Оценки прочности бетона практически всеми методами контроля, как механическими, так и иными с малым энергетическим воздействием на бетон, подвержены в большей степени влиянию параметров упругости бетона, чем его фактической прочности. Чувствительность неразрушающих методов к изменению параметров прочности бетона неоднозначна и зависит как от используемого косвенного параметра метода, так и от причин её вариации. Если потеря прочности бетона связана с деструктивными процессами, происходящими в его структуре вследствие механических перегрузок, термических воздействий, коррозии, нарушений технологии бетонирования и выдерживания в раннем возрасте, то низкоэнергетические методы позволяют надежно фиксировать изменения прочности, но именно в той степени, в какой прочность и упругость бетона будут взаимосвязаны. Если связь между упругостью и прочностью на сжатие бетона меняется, например, при смене его рецептуры, то указанные методы могут этого «не заметить» или даже давать совершенно противоположную оценку. Именно по этой причине такого рода методы являются *выраженно-технологозависимыми* по своей сути. Единственный путь их использования для оценки прочности бетона – адаптация под конкретную технологию бетонирования путем подбора соответствующих градуировочных зависимостей. К низкоэнергетическим методам можно отнести все стандартизированные склерометрические методы – пластической деформации, упругого отскока и ударного импульса.

Одними из самых независимых от технологических факторов бетона, после метода испытания выбуренных образцов, являются методы отрыва и скалывания по СТБ 2264-2012 [33] и ГОСТ 22690 [11], они же и самые энергозатратные.

Условно неразрушающий метод контроля прочности бетона путем испытания отобранных из конструкции образцов – кубов, призм, цилиндров, несмотря на высокую достоверность оценок прочности, не позволяют на практике получать большой массив отсчетов, что не всегда дает желаемую надежность оценки несущей

способности изделия. Большое значение имеют также используемые технологии изготовления конструкций, - центрифугирование, прессование, вибропрессование и др., которые затрудняют, а иногда и вовсе не позволяют изготовить соответствующие образцы. В этом плане, методы локального разрушения значительно универсальнее и надежнее, и могут быть рекомендованы в качестве «экспертных» для корректировки градуировочных зависимостей других неразрушающих методов, для экспертных оценок в ответственных и спорных случаях испытаний, хотя, как указывалось выше, число отдельных измерений остается небольшим, как по причине значительной трудоемкости, так и из-за опасности влияния на несущую способность контролируемого изделия.

### *2.1 Элементы механики контактного взаимодействия*

При знакомстве со склерометрическими методами испытания бетона и методами испытания металлов очевидными становятся 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 ниже метод динамического индентирования «универсален» и для контроля металла, и для полимеров, и для бетона. Особенностью склерометрических методов является то, что регистрируемый косвенный параметр является характеристикой не только контролируемого материала, а системы «контролируемый материал – измерительный прибор». Что создает некоторые метрологические проблемы: градуировочная зависимость для одного прибора не может быть применена к другому, даже близкому по конструкции.

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. Соппротивление пластической деформации в этом интервале масштабов становится зависимым от структуры материала соответствующего масштаба. В XX столетии массовые испытания индентированием ограничивались, как правило, измерениями твер-

дости. Если сопоставить такое испытание с испытанием на растяжение, то твердость фиксирует лишь одну точку на этой диаграмме с координатой напряжения и деформации. Характер диаграммы растяжения оставался неизвестным. В работах [4, 5] отмечается эффективность испытаний материалов с непрерывной регистрацией параметров  $F - \alpha$  во времени, что потенциально позволяет получить комплекс не только физико-механических, но и структурных характеристик материала [60].

Задача формализации взаимосвязи параметров индентирования упруго-пластичных материалов с их физико-механическими характеристиками с позиций теории упругости представляет собой нетривиальную задачу. 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.

### *Упругая деформация*

Напряженное состояние в зоне контакта индентора наиболее подробно изучено для случая упругого контакта сферы радиусом  $R$  с упругим полупространством под действием нормальной статической силы  $F$  (рис. 2.2,а). Количественный анализ напряжений на поверхности пятна контакта впервые был выполнен Г. Герцем [26]. Поэтому рассматриваемый случай получил название «герцевский контакт».

При таком контакте образуется невосстановленный отпечаток диаметром:

$$d = 2 \cdot r = 2 \left( \frac{3 \cdot R \cdot F}{4E^*} \right)^{1/3}, \quad (2.1)$$

где  $F$  – сила вдавливания;  $R$  – радиус сферического индентора в исходном положении;  $E^*$  - приведенный модуль упругости

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{E_1^*} + \frac{1}{E_2^*}, \quad (2.2)$$

$E_1^*$ ,  $E_2^*$  – приведенные модули упругости испытуемого материала и материала сферического индентора соответственно;



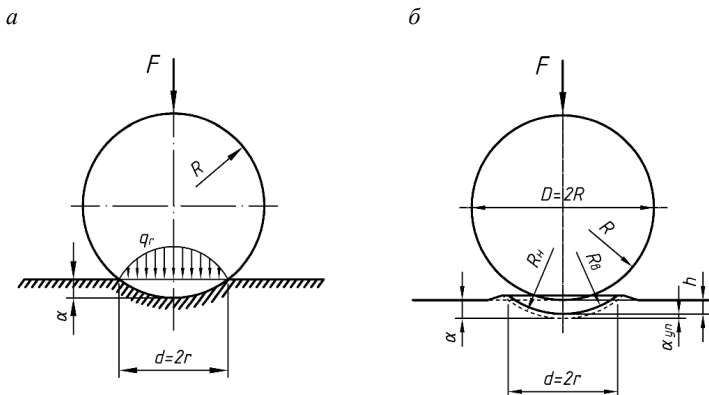


Рис. 2.2 – Схема упругого контакта сферического индентора с поверхностью материала: *a* – распределение контактного давления; *б* – схема упругопластического контакта;  $F$  – нагрузка вдавливания;  $D$  – диаметр шара в исходном положении;  $R$  – радиус сферического индентора в исходном положении;  $R_n$  – радиус кривизны невосстановленной поверхности отпечатка;  $R_v$  – радиус кривизны восстановленной поверхности отпечатка;  $\alpha$  – полное упругопластическое сближение (внедрение);  $\alpha_{yn}$  – упругое сближение (внедрение);  $h$  – пластической сближение;  $d$  – диаметр отпечатка;  $r$  – радиус отпечатка

$$E_{1,2}^* = \frac{1 - \mu_{1,2}^2}{E_{1,2}}, \quad (2.3)$$

где  $\mu_{1,2}$ ,  $E_{1,2}$  – коэффициент Пуассона и модуль упругости испытуемого материала и материала индентора соответственно.

Для сближения  $\alpha$  можно записать

$$\alpha = \frac{d^2}{4R} = \left( \frac{9F^2}{16R \cdot E^*{}^2} \right)^{1/3}. \quad (2.4)$$

Для силы индентирования справедливы выражения

$$F = \frac{4}{3} E^* \cdot \alpha^{3/2} \sqrt{R}, \quad (2.5)$$

$$F = \frac{1}{6R} E^* \cdot d^3. \quad (2.6)$$

Характер распределения давления по контактной площадке является эллиптическим:

$$q_r = \frac{3}{2} \cdot q_r \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r}{r_x}\right)^2} = q_{\max} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r}{r_x}\right)^2}, \quad (2.7)$$

где  $r_x$  – радиальное расстояние от центра контакта.

Среднее давление на контактной площадке диаметром  $d$  составит

$$q_{r,\text{cp}} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2}. \quad (2.8)$$

Среднее давление в 1,5 раза меньше максимального давления в центре контакта, которое определяется в виде:

$$q_{r,\text{max}} = \frac{6 \cdot F}{\pi \cdot d^2}. \quad (2.9)$$

### *Упругопластическая деформация*

В работе [60] показано, что максимальное касательное напряжение возникает на глубине, примерно равной половине радиуса контактной площадки  $r/2$ . Поэтому здесь следует ожидать появление первой пластической деформации в деформированном материале. На рис. 2.3 показано распределение напряжений в зоне контакта. Указанная глубина локализации области пластической деформации фактически определяет глубину контроля прочности.

Испытания материалов непрерывным вдавливанием индентора с измерением нагрузки и соответствующих ей геометрических параметров невосстановленного и восстановленного отпечатков позволяют получить упругую и упругопластическую области диаграммы вдавливания (рис. 2.4).

Диаграмма имеет линии нагружения  $OABC$  и разгрузки  $CD$ . С помощью линии разгрузки можно разделить полное упругопластическое сближение  $a$  на пластическую  $h$  и упругую  $a_{\text{уп}}$  составляющие. Характерными точками диаграммы непрерывного вдавливания  $F-a$  являются точки  $A$  и  $B$ . Точка  $A$  соответствует переходу упругой деформации материала в упругопластическую, а точка  $B$

характеризует предельное состояние устойчивого упругопластического деформирования.

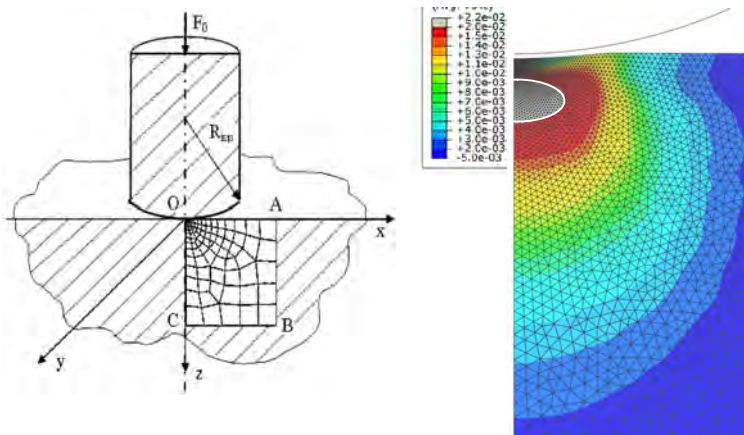


Рис. 2.3 – Схема процесса взаимодействия материала с сферическим индентором: контуром выделена область пластической деформации

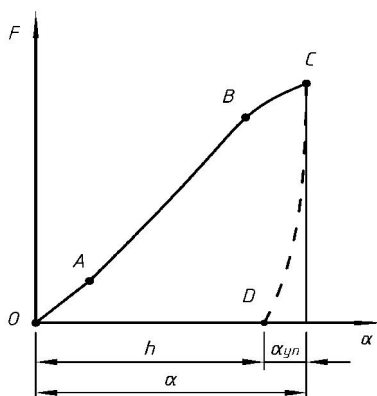


Рис. 2.4 – Диаграмма статического индентирования

Диаграмма имеет линии нагружения  $OABC$  и разгрузки  $CD$ . С помощью линии разгрузки можно разделить полное упругопластическое сближение  $\alpha$  на пластическую  $h$  и упругую  $\alpha_{уп}$  составляющие. Характерными точками диаграммы непрерывного вдавливания  $F - \alpha$  являются точки  $A$  и  $B$ . Точка  $A$  соответствует переходу

упругой деформации материала в упругопластическую, а точка  $B$  характеризует предельное состояние устойчивого упругопластического деформирования.

Местоположение точки  $B$  зависит от способности материала к упрочнению. Чем выше эта способность и, как следствие, выше предельная равномерная деформация, тем при большем значении  $\alpha$  наступает перегиб в точке  $B$ .

При вдавливании сферического индентора в качестве геометрического параметра невосстановленного отпечатка (рис. 2.1,б) целесообразно использовать диаметр  $d$  или упругопластическое сближение  $\alpha$ . Под упругопластическим сближением следует понимать сближение центра сферы с центром невосстановленной поверхности отпечатка.

В области упругопластического деформирования упругопластическое сближение  $\alpha$  состоит из упругого  $\alpha_{yn}$  и пластического  $h$  сближений:

$$\alpha = \alpha_{yn} + h . \quad (2.10)$$

В области упругого деформирования связь силы вдавливания  $F$  с параметрами  $d$  и  $\alpha$  описывается уравнениями Г. Герца (2.4) и (2.5). Участки упругой деформации и последующего ее перехода в упругопластическую деформацию можно получить из диаграммы  $F - \alpha$  (рис. 2.4). Испытывая материал ступенчатым или непрерывным вдавливанием индентора, можно получить зависимость нагрузки вдавливания от геометрических параметров восстановленного или невосстановленного отпечатка. В процессе вдавливания индентора материал претерпевает вначале упругую деформацию, а затем при превышении определенной нагрузки упругопластическую деформацию. Однако, если нагружение индентора идет ступенчато с разгрузкой на каждой ступени нагружения, то в этом случае можно получить диаграмму вдавливания только в области пластической деформации. Располагая устройствами для измерения геометрических параметров невосстановленного отпечатка (под нагрузкой) и восстановленного отпечатка (после снятия нагрузки), можно получить диаграмму вдавливания как в области упругой, так и в области упругопластической деформации. Оба типа этих диаграмм имеют свои характерные особенности, и содержат определенную инфор-

мацию о механических свойствах материала, деформированного вдавливанием индентора.

Из уравнений Г. Герца – формула (2.5) - можно получить формулы для расчета модуля нормальной упругости контролируемого материала

$$E_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\frac{d^3}{F} \cdot \frac{1}{6 \cdot R} \cdot \frac{1}{1 - \nu_2^2} \cdot \frac{1}{E_2}}, \quad (2.11)$$

$$E_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\frac{4 \cdot R^{0,5} \cdot (\alpha_{yn})_0}{3 \cdot F} \cdot \frac{1}{1 - \nu_2^2} \cdot \frac{1}{E_2}}. \quad (2.12)$$

Для большинства бетонов среднее значение коэффициента Пуассона  $\nu_1$ , входящего в уравнение, близко к 0,18, а упругие константы материала индентора  $E_2$  и  $\nu_2$  известны. Для количественной оценки  $E_1$  достаточно измерить нагрузку  $F$  и соответствующий ей диаметр невосстановленного отпечатка  $d$  или величину внедрения  $\alpha$  в области упругой деформации. Для более надежного определения  $E_1$  необходимо выполнить несколько испытаний при разных нагрузках с измерением параметров упругих отпечатков, а  $E_1$  оценить как среднее значение по результатам этих испытаний. При определении  $E_1$  важно не выйти за пределы области упругой деформации. Для этого необходимо убедиться после испытаний в отсутствии остаточного отпечатка на поверхности испытуемого материала. Если при определении  $E_1$  данным способом были получены остаточные отпечатки, то это подтверждает переход в области упругопластической деформации, а найденное значение  $E$  будет недействительно.

Указанные способы пригодны лишь для лабораторных условий, так как требуют специальной аппаратуры для высокоточных измерений и в большей степени приемлемы для испытания металлов.

Более простой способ определения  $E_1$  состоит в регистрации диаграммы непрерывного вдавливания  $F - \alpha$  в области упругопластической деформации с ветвями нагружения и разгрузки. Но в этом случае следует ввести в формулу Герца поправку, учитывающую влияние пластической деформации в зоне контакта на значение упругого сближения  $\alpha_{уп}$ .

Определение пластических и прочностных свойств бетона по данным индентирования значительно сложнее задачи определения его упругих свойств. Если обратиться для сравнения к методам определения прочностных свойств металлов, то можно заметить, что в качестве базового косвенного параметра используется твердость металла. Правда, и этот показатель неоднозначен, и зависит от метода его оценки. Различают твердость по Бринеллю, Виккерсу, Шору и другим методикам. Переход от этих параметров к нормативным показателям прочности – временному сопротивлению на разрыв  $\sigma_B$ , пределу текучести  $\sigma_T$ , и другим производится по приближенным эмпирическим зависимостям, в частности, для  $\sigma_{0,2}$

$$\begin{aligned}\sigma_{0,2} &= 0,2 \cdot HB \quad \text{для } HB < 1,50 \text{ ГПа} \\ \sigma_{0,2} &= 0,367 \cdot HB - 240 \quad \text{для } HB > 1,50 \text{ ГПа},\end{aligned}$$

где  $HB$  – твердость по Бринеллю.

В [59] установлена взаимосвязь для конструкционных сталей:

$$\sigma_B = 0,365 \cdot HB^{0,9893}.$$

## 2.2 Склерометрические методы испытания бетона

### 2.2.1 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 [33]. 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 Физделя И.А., 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 [45, 46, 52]. Оценка прочности бетона осуществляется 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. 2.5).

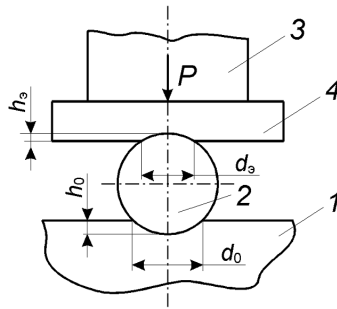


Рис. 2.5 – Схема метода пластической деформации  
 1 – испытуемый бетон; 2 – индентор; 3 – ударник; 4 – эталонный образец

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. Оценки прочности сильно подвержены влиянию состояния поверхностного слоя изделия. Основным недостатком этих методов 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. Наибольшую точность обеспечивает по данным [52] дисковый прибор ДПГ-4(5), так как линейные размеры отпечатка от диска, при одинаковой энергии ударника, значительно превосходят линейные размеры отпечатков других видов штампа, что снижает погрешность отсчета. В частности, при оценке прочности бетона в пределах от 7 до 30 МПа длина отпечатка диска ДПГ-4 меняется в пределах 42...26 мм, в то время как диаметр отпечатка молотка Физделя – от 6 до 11 мм.

Оценки прочности бетона методами пластической деформации, как и всеми другими склерометрическими методами, подвержены влиянию изменений температуры и влажности бетона. Учет замораживания бетона возможен введением поправочных коэффициентов, но этот способ приводит к снижению точности оценки прочности, так как повышение поверхностной твердости бетона при замораживании зависит не только от температуры, но и от степени водонасыщения и структуры бетона. Тем не менее, при соблюдении определенных условий, оговоренных в [11, 33], допускается произ-

водить оценку прочности 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 [3]. 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 снизить погрешность их измерения. Но при этом необходимо использовать скорректированную градуировочную зависимость метода.

Определение прочности бетона с использованием упомянутых приборов характеризуется низкой оперативностью, так как связано с визуальной оценкой размеров отпечатка. Указанное обстоятельство является причиной постепенного вытеснения приборов этого метода приборами методов упругого отскока и ударного импульса. Вытеснение из обращения метода пластической деформации является следствием отсутствия какой-либо автоматизации процесса измерения существующими приборами, а не «врожденным» недостатком самого принципа получения информации о прочности бетона. Реализация метода на новой технической основе сможет вернуть его в строй самых распространенных методов испытаний.

### *2.2.2 Метод упругого отскока*

Метод упругого отскока реализуется приборами–склерометрами или, как их еще называют, - молотками Шмидта (*Shmidt Hammer*). Метод и прибор контроля прочности бетона были разработаны Е. Шмидтом в 1948 году [125]. Система неразрушающего контроля бетонных конструкций с использованием молотков Шмидта была внедрена фирмой «Proseq» 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, часть 2, 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. Математические модели процессов квазистатического взаимодействия индентора и контролируемого материала базируются на теории упругого контакта Герца. К настоящему времени они получили развитие и уточнены в работах ряда исследователей [4-5, 48, 58]. Полная физическая картина ударного взаимодействия индентора с поверхностью бетона весьма сложна и к настоящему времени не формализована исчерпывающим образом. Существующие модели процесса взаимодействия твердого индентора с бетоном основываются на феноменологических теориях прочности, в частности, - на теории максимальных напряжений, в которой критерием прочности является максимальное напряжение. В качестве реологической модели бетона при анализе рассматриваются варианты упруго-вязкопластических моделей, в частности модели Шведова-Бингама.

На рис. 2.6 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. Как показано в [26, 61], 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. В этом случае связь между силой вдавливания индентора  $F$ , диаметром отпечатка на поверхности  $d=2a$ , внедрением индентора  $\alpha$  и приведенным модулем упругости системы индентор-бетон  $E^*$  выражается соотношениями (2.4) и (2.5). Если напряжения в контактной зоне превышают предел прочности материала, то возникает пластическая деформация, которая по мере вдавливания индентора распространяется на все пятно контакта.

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 пластиче-

ской деформации. Основываясь на результатах полученных [61], для случая упругопластического ударного взаимодействия индентора с бетоном можно записать:

$$\frac{W'}{W_0} = \frac{V'^2}{V_0^2} = \frac{\pi^{5/4} \cdot 4^{3/4} \cdot 3^{9/4} \cdot \sigma_d^{5/4} \cdot R^{3/4}}{10 \cdot W_0^{1/4} \cdot E^*} \quad (2.13)$$

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;  $\sigma_d$  - динамический предел упругости бетона.

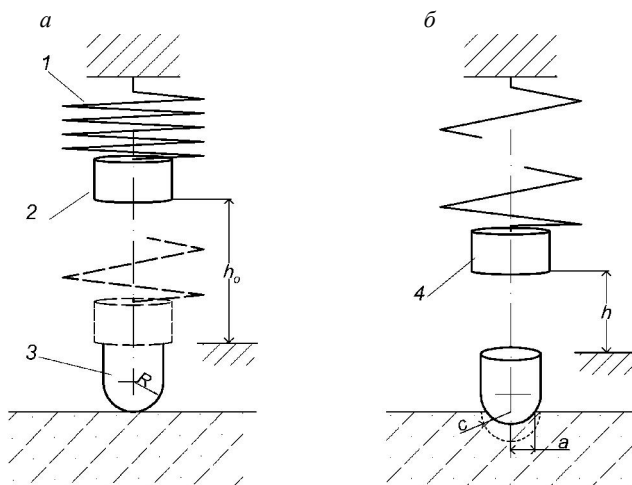


Рис. 2.6 – Схема и основные элементы ударного склерометра:  
*а* – исходное состояние и начало ударного взаимодействия с поверхностью контролируемого изделия; *б* – момент регистрации отскока бойка  
 1 – рабочая пружина; 2 – боек в исходном положении;  
 3 – индентор; 4 – положение бойка после отскока

Из формулы (2.13) 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 типы, в частности:

*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 рисунках 2.7, 2.8 показаны типичные образцы приборов этого метода испытаний.

Конструкции молотков Шмидта разных изготовителей, в большинстве, содержат одинаковые узлы, имеющие принципиальные отличия (рис. 2.9). Существуют модификации приборов со встроенной механической регистрацией индекса отскока на бумажной ленте. Имеются образцы так называемых «электронных» склерометров, в частности DIGI SCHMIDT, с улучшенными пользовательскими функциями, - с электронной регистрацией и обработкой данных (рис. 2.8). 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.



Рис. 2.7 – Образцы приборов упругого отскока



Рис. 2.8 – Прибор испытания бетона Digi-Schmidt 2000

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.

На рис. 2.1,б показана область пластической деформации бетона в зоне контакта его с индентором. По данным [26] линейный размер области упругопластической среды, в которой напряжения дости-

гают 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 прибора ИПС-МГ4 – 2...5 мм. Соответственно радиус упругопластической зоны для молотка Шмидта – 4...10 мм, для ИПС-МГ4 – 2,5...5 мм.

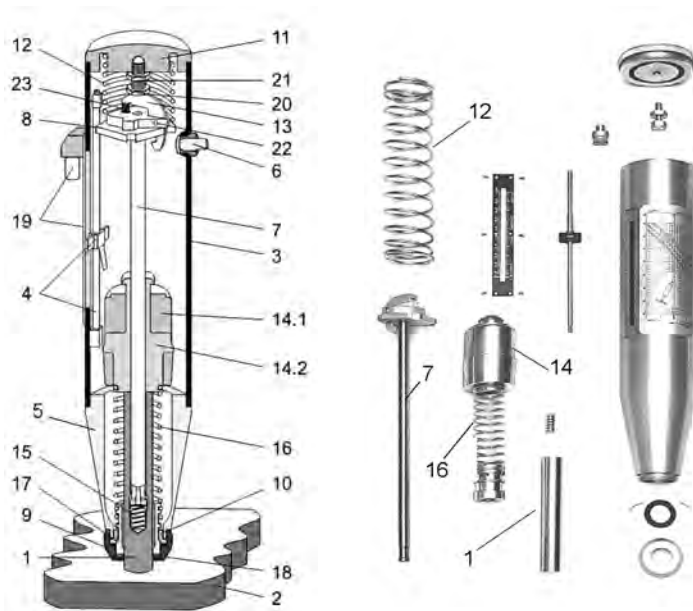


Рис. 2.9 – Конструкция типичного молотка Шмидта

- 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 - боёк: 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 - регулировочный винт

На рис. 2.10 приведены данные контроля прочности бетона монолитной бетонной плиты перекрытия несколькими приборами: ОМШ-1 – упругий отскок, ПОС-30 «Скол» – метод отрыва со ска-

ливанием и бетон-тестер – ультразвуковой импульсный метод. Возраст бетона плиты 30..35 суток. Как видно на рис. 2.10, оценки прочности бетона методом упругого отскока и метода отрыва со скалыванием различаются в 2,5...3,5 раза при контроле неподготовленной поверхности; и 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.

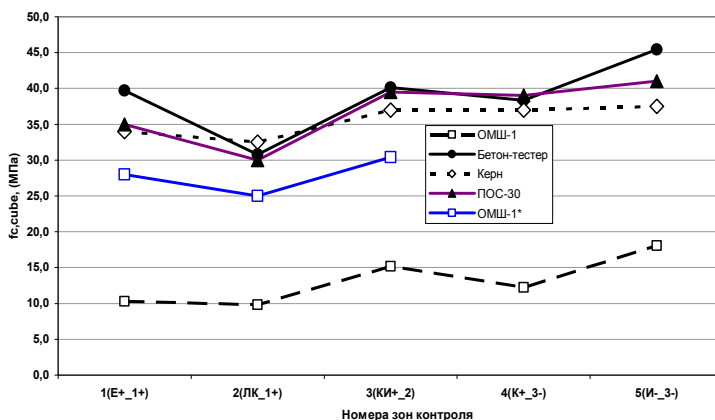


Рис. 2.10 – Распределение оценок прочности бетона плиты перекрытия по ее поверхности

*OMШ-1 – оценки прочности бетона склерометром без подготовки поверхности; OMШ-1\* - оценки на выровненной поверхности (снят слой бетона 3...5 мм); Керна – 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 механических методов оценки прочности бетона плиты 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 мм до 6 мм. При большей глубине карбонизации поправочный коэффициент не меняется и остается на уровне около 40 %.

На рис. 2.11 приведены диаграммы для определения поправочного коэффициента снижения индекса отскока, который компания Proceq рекомендует для своих приборов. Указанная в стандарте JGJ/T 23-2001 предельная толщина карбонизации – 6 мм косвенно характеризует «проникающая способность» метода упругого отскока. Заметим, что предельная толщина карбонизации – показатель, зависящий от энергии удара, а значит – зависит от типа молотка.

В работе [130] приведены данные экспериментов, указывающие на несколько иные оценки влияния карбонизации на показатели метода упругого отскока.

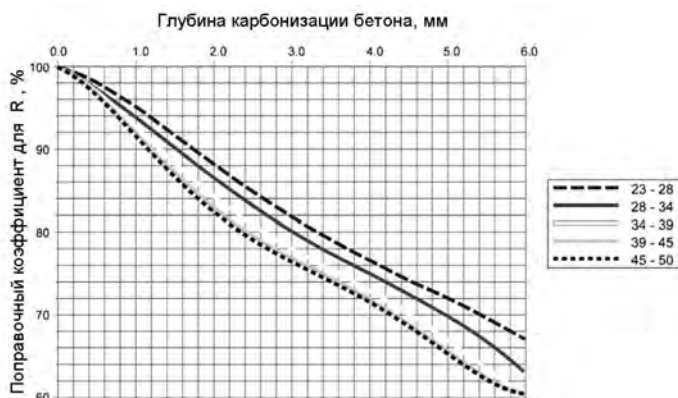


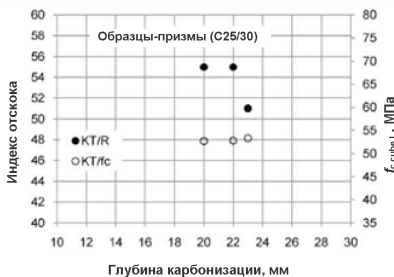
Рис. 2.11 – Зависимость поправочного коэффициента для индекса отскока от глубины карбонизации бетона

На рис. 2.12 приведены данные испытаний бетонных образцов-призм из бетона с в/ц 0,45 и 0,55, прошедших «искусственную» карбонизацию в камере заполненной углекислым газом с концентрацией 3% в течение времени до 100 суток, при температуре 20°C и влажности 65 %. По данным [130] предельная толщина карбонизации составляет около 15 мм для молотка *Digi\_Schmidt* (тип N).

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.

а



б

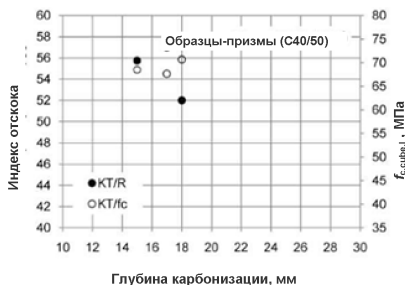


Рис. 2.12 – Зависимость индекса отскока (R) и оценки прочности  $f_{c,cube}$  от глубины карбонизации КТ бетона для бетона проектного класса С25/30 (а) и С40/50 (б)

Испытания образцов-кубов показали, что для отслеживания кинетики твердения, в качестве градуировочных зависимостей для указанных ниже (табл. 2.1) четырех вариантов состава бетона вполне приемлемо использовать линейные вида  $R_{сж} = a + b \cdot h$ , рекомендованные ГОСТ 22690.

Остаточное среднеквадратичное отклонение  $S_T$  рассчитывалось по формуле:

$$S_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_{i,\phi} - f_{iH})^2}{N-2}}, \quad (2.14)$$

где  $f_{i,Sh}$  – прочность бетона в  $i$ -той серии образцов, определенная по градуировочной зависимости;  $f_{j,\phi}$  – единичные значения прочности для  $j$ -й серии образцов, определенные по результатам прессовых испытаний;  $N$  – число серий образцов ( $N=7$  для бетонов С25/30 и С35/45;  $N=6$  для всех остальных).

Несколько лучшие результаты, – снижение остаточного среднеквадратичного отклонения до значения  $S_{T,min}$ , давало использование нелинейных зависимостей.



Таблица 2.1 – Параметры линейных градуировочных зависимостей склерометра ОМШ-1

№ п/п	Бетон состав	Коэффициенты		$S_T/f_{c,m}$ , %	$r$	$S_T^*/f_{c,m}$ , %	$r^*$
		$a$	$b$				
1	C25/30 №1	-16,95	1,814	7,35	0,987	9,14	0,987
2	C30/37 №3	-35,92	2,453	3,8	0,997	10,7	0,997
3	C35/45 №2	-21,74	1,876	8,9	0,97	13,0	0,97
4	C35/45 №4	-23,34	2,0636	9,8	0,97	10,4	0,97

Использовались функции, с числом коэффициентов не более трех, обеспечившие минимальное значение  $S_T$ . Зависимость

$$R_{сжс} = -23,49 + 2,03 \cdot h, \quad (2.15)$$

которую можно рассматривать в качестве «универсальной» для рассмотренных четырех составов бетона, обеспечивала для всего массива данных испытаний бетонных образцов  $S_T=10,4\%$ , при коэффициенте корреляции  $r = 0,97$ . При этом, наилучший вариант приближения достигался зависимостью вида  $f_{c,cube} = A \cdot \exp\{-(h-B)^2/2C^2\}$  – функцией Гаусса. Но по статистическим параметрам приближения он отличался от линейной функции незначительно:  $S_T=9,7\%$ ,  $r = 0,973$ . Такого же порядка параметры приближения обеспечивал полином 3-й степени ( $S_T=9,8\%$ ,  $r = 0,974$ ).

При построении и использовании градуировочных зависимостей для склерометров необходимо учитывать систематическую ошибку измерения, возникающую вследствие смены направления рабочей ориентации прибора. В приборах метода ударного импульса, такого рода ошибка устраняется поправкой, вводимой автоматически, после предварительной настройки режима измерения.

#### *Влияние рабочей ориентации склерометра на результаты измерений*

Для приборов типа молотка Шмидта (*Original Shmidt*, ОМШ-1, С181 и др.) коррекцию необходимо выполнять введением поправки  $d_{II}$  к значению косвенного параметра – индексу отскока индентора.

$$f_{c,Sh}^* = f_{c,Sh}(h + \Delta h),$$

где  $f_{c,Sh}^*$  – скорректированное значение прочности бетона, определенной по градуировочной зависимости.

При отскоке индентора от поверхности бетона кинетическая энергия расходуется на совершение работы для сжатия тарированной пружины прибора (рис. 2.9). Если ось прибора не горизонтальна, то проявляется влияние силы тяжести  $P$ , так как в этом случае энергия индентора расходуется и на её преодоление. С другой стороны, сила тяжести влияет на разгон индентора, и, в этом случае, её влияние на величину отскока обратно по знаку. Если бы взаимодействие индентора и поверхности бетона было абсолютно упругим, то силу тяжести - направление оси прибора можно было не учитывать. При упругопластическом ударе картина меняется. Из выражения (2.13) следует

$$W' = W_0^{3/4} \cdot Z, \quad (2.16)$$

где

$$Z = \frac{\pi^{5/4} \cdot 4^{3/4} \cdot 3^{9/4} \cdot \sigma_d^{5/4} \cdot R^{3/4}}{10 \cdot E^*}. \quad (2.17)$$

Относительное изменение за счет действия силы тяжести кинетической энергии индентора к моменту удара составит

$$\frac{\Delta W_0}{W_0} = \frac{P}{F_0 + G/2 \cdot h_0}, \quad (2.18)$$

где  $P$  – сила тяжести действующая на индентор;  $G$  – жесткость пружины;  $F_0$  – сила упругости рабочей пружины к моменту удара;  $h_0$  – рабочий (разгонный) ход индентора.

Отношение кинетической энергии индентора после отскока при отсутствии влияния силы тяжести  $W'$  к его энергии изменившейся за счет влияния силы тяжести  $W'_p$ , составит

$$\frac{W'}{W'_p} = \left( 1 + \frac{P}{F_0 + \frac{G \cdot h_0}{2}} \right)^{-3/4}. \quad (2.19)$$

Кинетическая энергия отскочившего индентора затрачивается на сжатие градуированной пружины на пути перемещения  $L$ ; уравнение, описывающее процесс перехода энергии, имеет вид

$$\left[ L \cdot F_0 + \frac{G \cdot L^2}{2} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{P}{F_0 + \frac{G \cdot h_0}{2}} \right]^{3/4} = \left[ (L - \delta L_P) \cdot F_0 + \frac{G}{2} (L - \delta L_{II})^2 + P(L - \delta L_{II}) \right], \quad (2.20)$$

где  $\delta L_P$  – изменение отскока за счет влияния силы тяжести.

Ниже рассмотрены решения уравнения (2.20) относительно величины  $\delta L_P$ , для случаев удара снизу вверх и удара сверху вниз.

*Удар сверху вниз:*

уравнение (2.20) принимает вид

$$K_{Wdown} \cdot L \cdot F_0 + \frac{K_{Wdown} \cdot G \cdot L^2}{2} = \left[ (L - \delta L_P)(F_0 + P) + (L - \delta L_P)^2 \cdot \frac{G}{2} \right], \quad (2.21)$$

где

$$K_{Wdown} = \left[ 1 + \frac{P}{\left( F_0 + \frac{G \cdot h_0}{2} \right)} \right]^{3/4}.$$

Решения уравнения для  $\delta L_P$  имеют вид:

$$\left[ \frac{1}{2G} \cdot \left[ 2F_0 + 2P + 2GL + 2 \cdot (F_0^2 + 2F_0P + P^2 + 2G \cdot K_{Wdown} \cdot LF_0 + K_{Wdown} \cdot G^2L^2)^{1/2} \right] \right. \\ \left. \frac{1}{2G} \cdot \left[ 2F_0 + 2P + 2GL - 2 \cdot (F_0^2 + 2F_0P + P^2 + 2G \cdot K_{Wdown} \cdot LF_0 + K_{Wdown} \cdot G^2L^2)^{1/2} \right] \right]. \quad (2.22)$$

Физически реализуемым является нижнее.

Удар снизу вверх:

$$K_{Wup} \cdot LF_0 + \frac{K_{Wup} \cdot GL^2}{2} = \left[ (L + \delta L_p)(F_0 - P) + (L + \delta L_p)^2 \cdot \frac{G}{2} \right], \quad (2.23)$$

где

$$K_{Wup} = \left[ 1 - \frac{P}{\left( F_0 + \frac{G \cdot B}{2} \right)} \right]^{3/4}.$$

Физически реализуемым решением для  $\delta L_p$  является следующее:

$$\delta L_p = \frac{1}{2G} \cdot \left[ -2F_0 + 2P - 2GL + 2 \cdot (F_0^2 + 2F_0P + P^2 + 2G \cdot K_{Wup} \cdot LF_0 + K_{Wup} \cdot G^2 L^2)^{1/2} \right] \quad (2.24)$$

На рис. 2.13 приведены графики зависимостей поправок от высоты отскока для двух направлений удара, рассчитанные по уравнениям (2.21) и (2.23), - кривые 1 и 3.

Зависимости 2 и 4 получены с учетом влияния сил трения бойка по направляющей; коэффициент трения принимался равным 0,05. Начальные условия: жесткость пружины, рабочий ход, масса бойка - принимались близкими к фактическим параметрам типовых конструкций молотка Шмидта. Значения поправок для случая удара вверх (кривые 3 и 4) приведены с обратным знаком.

Характерным для рассчитанных зависимостей являются:

- знакопеременный характер поправок: положительный знак поправки для удара вниз, отрицательный – для удара вверх;
- неравенство абсолютных значений поправок для противоположных направлений удара
- наличие экстремума в диапазоне значений отскока 30...45 мм.

Экспериментальная оценка поправок была выполнена на четырех бетонных образцах-призмах 150x150x400 мм в разных сроках твердения. Образцы находились в вертикальном положении, контроль производился на торцевых гранях. Каждая отметка на рис. 2.13 соответствует среднему значению трех измерений.

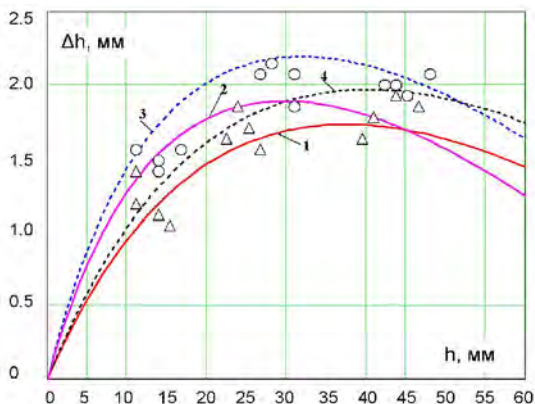


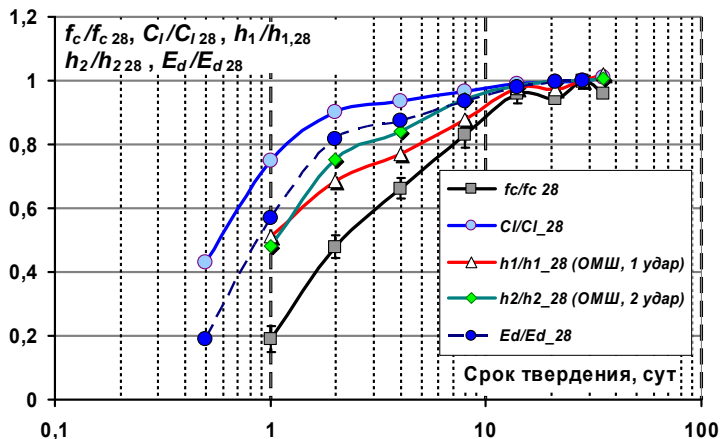
Рис. 2.13 – Зависимости поправок от высоты отскока и направления удара  
 1 – поправка для удара вниз, без учета сил трения; 2 – с учетом сил трения;  
 3 – поправка для удара вверх, без учета сил трения; 4 – с учетом сил трения;  
 ○ – экспериментальные данные поправок для удара сверху вниз;  
 △ – для удара снизу вверх.

Приведенные данные экспериментальных определений поправок – кривые 3, 4 рис. 2.13 - отличаются от расчетных в среднем на 5...20 %.

Определенный интерес и возможную перспективу совершенствования методики и разработки новых средств механического контроля заключает в себе, по нашему мнению, модификация склерометрических методов, состоящая в комплексной оценке прочности и упругости бетона по результатам нескольких последовательных измерений в одной и той же точке контроля. Развитию этого направления посвящена работа Б. Ужполявичуса [93]. Как видно из выражения (2.13) коэффициент восстановления скорости зависит от соотношения показателя прочности материала  $\sigma$  и модуля упругости  $E$ , что делает оценку этих параметров неоднозначной. Изменение условий взаимодействия индентора с бетоном позволяет разделить оценки указанных параметров. Очевидно, что коэффициент восстановления скорости будет минимальным для первого удара, и в максимальной степени зависеть от величины  $\sigma$ . Повторное индентирование уже имеющегося отпечатка можно рассматривать как внедрение индентора с бóльшим радиусом. Последующие удары в

уже имеющийся отпечаток будут в большей степени зависеть от параметров упругости материала, чем его прочности.

На рис. 2.14 приведены диаграммы кинетики твердения бетона (проектный класс по прочности С35/45), полученные в лабораторных условиях на образцах кубах и призмах.



$f_{cm} = 53,5$  МПа; приращение скорости ультразвукового импульса – 2,374 м/с·мин,  $\tau = 0,5$  сут (класс бетона – С30/37, состав №3 – см. прил. табл. А.1)

Рис. 2.14 – Диаграммы кинетики твердения бетона по данным прессовых испытаний, методов упругого отскока и ультразвукового импульсного

Ординаты кривых представлены относительными значениями: кривая I – отношением значений прочности  $f_c/f_{c28}$  по данным прессовых испытаний кубов; кривая II – относительной скорости продольной ультразвуковой волны в призмах  $c/c_{28}$ , для базы – 150 мм; кривые III и IV – отношением индекса отскока  $h/h_{28}$ , соответственно для обычного (одноударного) измерения, и для повторного удара – кривая IV.

На ранней стадии твердения бетона 0,5...2 суток, когда имеет место быстрое нарастание модуля упругости, кривые II и IV идут параллельно. В интервале 2...7 суток – когда рост модуля упругости затормаживается, а рост прочности бетона продолжается – подъем кривой IV, также как и кривой III обусловлен возрастанием прочности, корреляция кривых III и IV увеличивается.

На рис. 2.15 приведены кинетические кривые изменения отношения значений отскоков бойка для повторного и первого измерений в одной и той же точке контроля образцов-кубов.

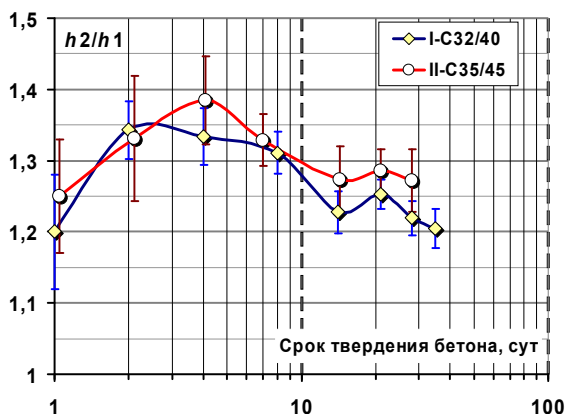


Рис. 2.15 – Диаграмма влияния срока твердения бетона на отношение  $h_2/h_1$ , по данным испытания образцов-кубов 100х100х100 мм  
 I – бетон (состав №1) класса C32/40; II – бетон (состав №2) класса C35/45  
 (см. прил. таб. А.1)

Испытания проводились на двух боковых гранях, с давлением зажатия образцов между плитами 1.3 МПа параллельно с прессовыми испытаниями. Характерным является наличие выраженного максимума в интервале сроков 1...7 суток, и менее выраженного, но повторившегося для всех применявшихся составов бетона локального минимума в интервале 7..14 суток.

Значительная неопределенность в оценке параметра  $h_2/h_1$  обусловлена неточностью центровки при установке наконечника молотка Шмидта в имеющийся отпечаток. Снижение соотношения  $h_2/h_1$  в начальной стадии твердения 1...2 суток связано с тем, что диаметр отпечатка достигает диаметра стержня индентора, и дальнейшее увеличение диаметра отпечатка становится невозможным. Соответственно нарушается соотношение и для коэффициента восстановления скорости индентора. Для испытаний бетона в таком сроке твердения следует либо снизить энергию удара, либо применить дополнительную насадку большого диаметра на стержень индентора.

Для тяжелых бетонов других составов и классов, - испытывались бетоны проектных классов С25/30, С30/37 и С35/45 (см. прил. таб. А.1), получены аналогичные результаты, что подтверждает возможность селективной оценки параметров прочности и упругости бетона методом упругого отскока.

Результаты испытаний позволили рассчитать поправочные коэффициенты к градуировочным зависимостям метода упруго отскока для оценки прочности бетона в раннем сроке твердения – от 2 до 28 суток (рис. 2.16). Кроме того, рассмотренный показатель может служить индикатором незрелости бетона.

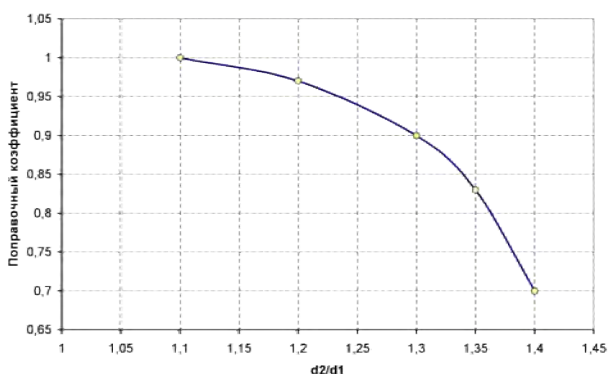


Рис. 2.16 – Зависимость поправочного коэффициента к оценкам прочности методом упругого отскока от параметра  $h_2/h_1$

Рассмотренная методика не позволяет отдельно учесть влияние модуля упругости бетона  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$  на результаты измерений. В формулах описывающих процесс индентирования сферическим индентором участвует комплексный показатель упругости - приведенный модуль упругости  $E^*$  (2.2), который включает модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Разделить их, изменив условия индентирования, не представляется возможным. Обычно коэффициент Пуассона для зрелого бетона принимают равным 0,18...0,2. Для бетона в начале срока твердения этот показатель может быть заметно большим, достигая значений 0,35...0,3. Игнорирование этого обстоятельства может приводить к погрешности в оценке модуля упругости бетона в начальных сроках твердения ультразвуковым методом до 35...50%.



### 2.2.3 Метод ударного импульса

Использование для измерения прочности бетона других характеристик, описывающих динамику процесса его ударного взаимодействия с индентором, например, частотно-временных, может обеспечить определенный эффект: временные параметры взаимодействия выгодны с позиций современной аппаратной реализации метода, так как временной интервал может быть измерен с точностью значительно большей, чем высота отскока или диаметр отпечатка. На практике это направление развития механических методов получило в разработке ударно-импульсного метода [32]. Физическая основа метода позволяет проводить параллель с методами упругого отскока и пластической деформации.

Определение прочности бетона осуществляется на основе установленной разработчиками зависимости близкой к линейной:

$$R_{сж} = k \cdot dF/dt, \quad (2.25)$$

где  $F$  – сила соударения твердосплавного индентора с поверхностью бетона;  $t$  – время взаимодействия.

Данный метод определения прочности бетона, как и рассмотренный выше метод упругого отскока, использует интегральные косвенные параметры: амплитуду импульса силового взаимодействия и его длительность. Метод ударного импульса также 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»). Следует заметить, что в странах Евросоюза и США в перечне стандартизированных этого метода нет. Авторы не обнаружили и ссылок на метод упругого отскока в публикациях западных исследователей.

Приборы метода ударного импульса 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, об-

следовании зданий, сооружений и конструкций; диапазон измерения прочности бетона – 2...100 МПа, энергия удара - 0,07...0,12 Дж. Конструктивно индентор таких приборов представляет собой акселерометр (рис. 2.17), генерирующий электрический сигнал, содержащий информацию о динамике взаимодействия индентора с контролируемой поверхностью. Амплитуда сигнала  $U$  соответствует максимальной силе взаимодействия, а длительность сигнала  $\tau$  – времени взаимодействия. Большшему значению прочности и твердости испытываемого материала соответствуют (кривая I) меньшая длительность сигнала  $\tau_1$  и большая амплитуда  $U_1$ . Обычно в качестве чувствительного преобразующего элемента используется вставка из пьезокерамики.

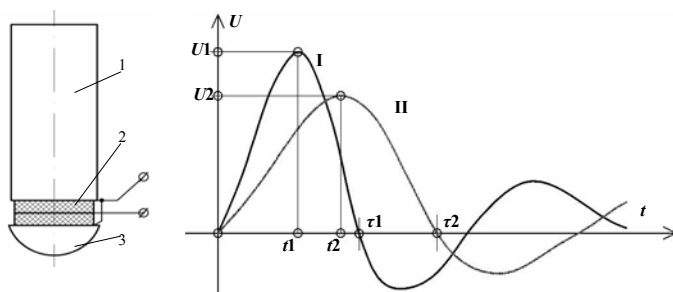


Рис. 2.17 – Сенсорный элемент прибора метода ударного импульса и типичные временные диаграммы его сигнала  
 1 – боек; 2 – пьезоэлемент; 3 – твердосплавный наконечник

Принцип работы прибора заключается в обработке импульсной переходной функции электрического сигнала, возникающего в чувствительном элементе при ударе о бетон: пик сигнала (рис. 2.17 и рис. 2.19) характеризует ударную твердость верхнего слоя материала, затухание – упруго-деформативные свойства материала.

На рис. 2.18 приведены временные диаграммы сигналов датчика прибора ИПС-МГ4 для различных масштабов времени. Информационными (косвенными) параметрами прочности бетона могут являться длительность и амплитуда первого импульса (рис. 2.19).

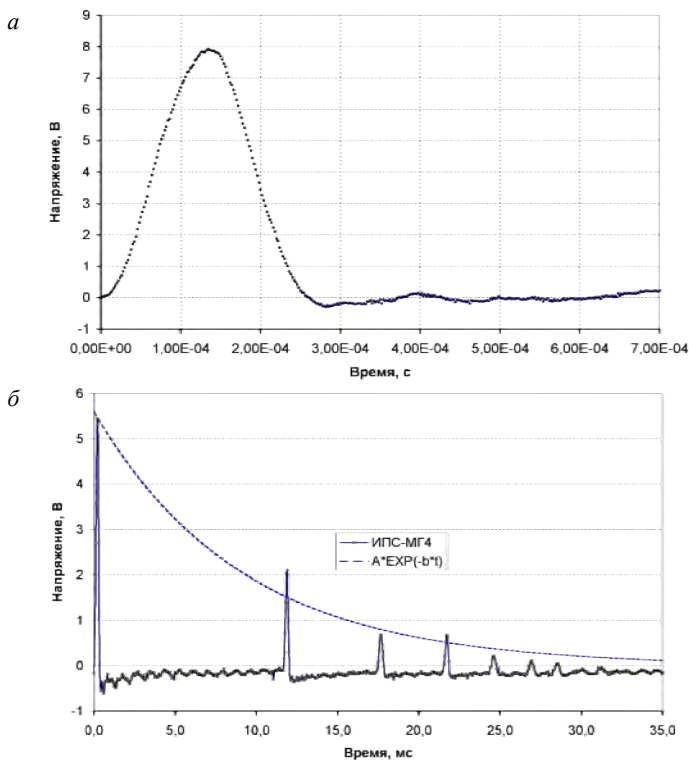


Рис. 2.18 – Временные диаграммы сигналов датчика прибора ИПС-МГ4  
*а – первый импульс ударного взаимодействия; б – вся последовательность импульсов*

Информацию об упругих свойствах бетона содержит показатель *b* (рис. 2.18, б), характеризующий затухание всей импульсной последовательности. Так как, начиная со второго импульса, индентирование происходит с меньшей энергией и уже образовавшейся лунки, то компонента пластической деформации с каждым ударом уменьшается, а взаимодействие индентора с бетоном становится упругим. Заметим, что изготовители приборов этого метода не указывают ни косвенных параметров, ни алгоритма их обработки, ограничиваясь упоминаниями об одно- или двухпараметровом контроле.

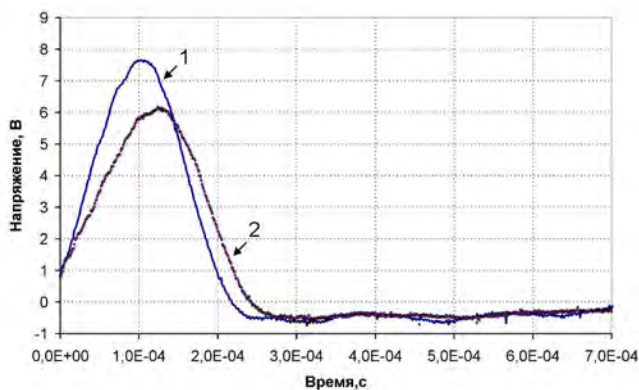


Рис. 2.19 – Временные диаграммы первого импульса индентирования образцов-кубов бетона  
 1 –  $f_c = 46 \text{ МПа}$ ; 2 –  $f_c = 35,5 \text{ МПа}$

Преобразование получаемого электрического параметра в прочность производится по градуировочной зависимости в форме полинома

$$f_{c,imp} = (a_0 + a_1 B + a_2 B^2) a_\phi k_\phi; \quad (2.26)$$

формулам:

$$B = U a_n$$

где  $B$  – условная твердость материала;  $U$  – эквивалент электрического параметра;  $f_{c,imp}$  – оценка прочности (МПа);  $a_n$  – коэффициент преобразования;  $a_\phi$  – коэффициент возраста бетона;  $k_\phi$  – коэффициент формы;  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  – коэффициенты аппроксимирующего полинома.

Метод ударного импульса не является безэталонным, он требует использования индивидуальных градуировочных зависимостей. Применение прибора ИПС-МГ4 (метод ударного импульса) для контроля кинетики твердения бетонных образцов выявило заметное (от 10 до 40 %) занижение прочности твердеющего бетона указанных в таблице А1 (см. прил. А) составов, при использовании базовой градуировочной зависимости, заложенной в измерительный алгоритм прибора. Коррекция оценок прочности бетона прибором

ИПС-МГ4 производилась поправочными функциями  $F_n$ , в соответствии с формулой

$$f_{c,H}^* = F_{II}(f_{c,H}^{basic}),$$

где  $f_{c,H}^*$  – скорректированная оценка прочности;  $f_{c,H}^{basic}$  – оценка по базовой зависимости;  $F_{II}$  – поправочная функция.

Варианты поправочных функций представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Поправочные функции для ИПС-МГ4-01

№ п/п	Бетон, состав	$f_{c,H} = F_{II}(f_{c,H}^{basic})$	$S_T/f_{cm}$ %	$r$	$S^*/f_{cm}$ %	$r^*$
1	C25/30 №1	$f_1 = 0,918 \cdot f_{c,H}^{basic} + 11,1$	10,0	0,96	11,1	0,96
2	C30/37 №3	$f_3 = 40,16 \cdot \ln(f_{c,H}^{basic}) - 94,6$	3,5	0,99	10,7	0,99
3	C35/45 №2	$f_2 = 59,53 \cdot \ln(f_{c,H}^{basic}) - 174,6$	12,4	0,88	19,2	0,88
4	C35/45 №4	$f_4 = 29,3 \cdot \ln(f_{c,H}^{basic}) - 57,9$	7,6	0,94	8,6	0,94

$S_T$  – остаточное среднее квадратическое отклонение градуировочной зависимости, МПа;

$f_{cm}$  – среднее значение прочности образцов (по данным прессовых испытаний), МПа;

$r$  – коэффициент корреляции;

$S^*$ ,  $r^*$  – остаточное среднее квадратическое отклонение и коэффициент корреляции для «универсальной» градуировочной зависимости  $f_{c,H} = 29,63 \cdot \ln(f_{c,H}^{basic}) - 59,88$ .

Получить устойчивые результаты прибором ИПС-МГ4-01 удалось лишь на вторые сутки твердения бетона; молоток Шмидта ОМШ-1 позволял проводить измерения и в суточном возрасте (рис. 2.14 и рис. 2.20).

Оценки остаточного среднего квадратического отклонения в таблице 2.4 приведены без отбраковки единичных результатов. Каждое единичное значение прочности представляет среднее арифметическое 8-и измерений для ОМШ-1; и 6-и – для ИПС-МГ4, каждый из которых, в свою очередь, получался усреднением 15 отсчетов прочности бетонного образца.

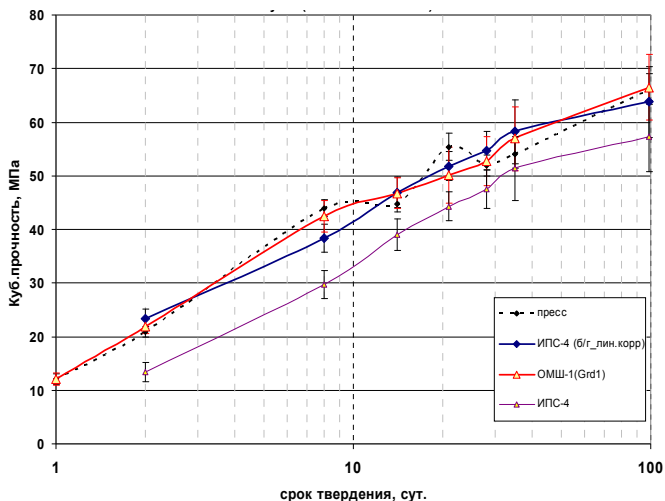
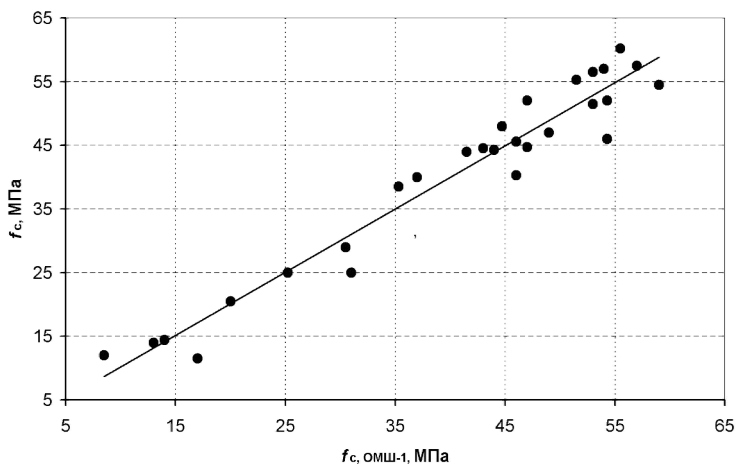


Рис. 2.20 – Диаграммы кинетики твердения бетона (состав №1 см. прил.табл. А.1): «пресс» - данные прессовых испытаний кубов 100x100x100 мм «ИПС-МГ4(б/г\_лин. корр) – скорректированные оценки прочности прибором ИПС-4МГ, функция коррекции линейная; «ОМШ-1 (Grd1)» - оценки прочности образцов прибором ОМШ-1, градуировочная зависимость №1 -  $f_{c,cube} = -16,95 + 1,814 \cdot d$ ; «ИПС-4МГ» - оценки прочности прибором ИПС-МГ4 с использованием базовой градуировочной зависимости

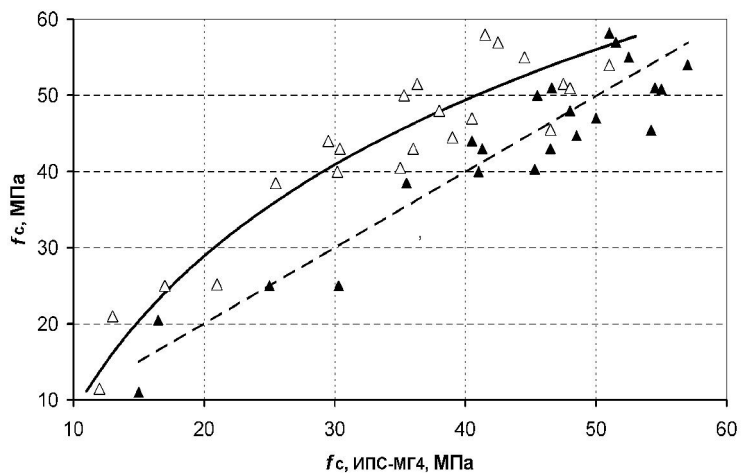
Для сравнения двух методов контроля, на рисунках 2.21 и 2.22 приведены экспериментальные данные оценок прочности бетонных образцов четырех составов (см. прил. табл. А.1) по результатам прессовых испытаний и выполненных совместными измерениями методами упругого отскока (ОМШ-1) и ударного импульса (ИПС-МГ4).

Как недостаток приборов измерения прочности бетона ударным методом можно отметить их низкую чувствительность к структурным нарушениям – микро- и макротрещинам, большое влияние на результат измерения присутствующих в зоне воздействия сенсора локальных неоднородностей бетона (зерен крупного заполнителя), невысокую «проникающую» способность, как следствие малой энергии удара и малой «вовлеченной» массы бетона, ограниченную поверхностным слоем бетона толщиной 3...5 мм.



○ – оценки прочности по градуировке  $f_{c,Sh} = -23,49 + 2,03 \cdot h$

Рис. 2.21 – Соответствие оценок прочности бетонных образцов методом упругого отскока и прессовых испытаний



Δ – оценки прочности по базовой градуировке;

▲ – оценки прочности по градуировке:  $f_c = 29,63 \cdot \ln(R_d) - 59,88$

Рис. 2.22 – Соответствие оценок прочности бетонных образцов методом ударного импульса и прессовых испытаний

С другой стороны, небольшая масса индентора и малая энергия удара позволяют успешно контролировать изделия, для которых

поверхностная твердость является определяющим 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. 2.23 и таб. В.1 (см. прил. В) приведены данные испытания бетонных полов, выполненных с упрочнением верхнего слоя механическим втиранием упрочняющего компонента (см. рис. В.1 приложения).

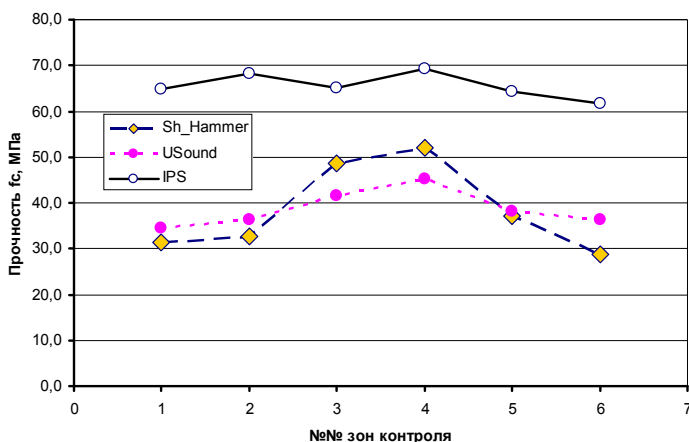


Рис. 2.23 – Распределение оценок прочности бетонной плиты с упрочненным верхним слоем неразрушающими методами испытаний

Бетонное основание пола (толщина  $\sim 5...7$  см) выполнено из сталефибробетона проектного класса по прочности C25/30. Упрочнению подвергался верхний слой бетона толщиной 3...4 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 в толщине упрочненного слоя выбранных зон контроля бетонного. Влияние упрочняющего слоя на результаты испытаний методом упругого отскока аналогично влиянию карбонизации



(рис. 2.11, 2.12). Оценки ударно-импульсного метода (ИПС-МГ4) достаточно ровные и соответствуют проектной прочности для упругоненного 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 упругоненного слоя. ОМШ-1, имеющий значительно бoльшую 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 изменения не может быть объективной и достоверной.

Следует заметить, что в странах Евросоюза и США в перечне стандартизированных этого метода нет. Авторы не обнаружили и ссылок на метод ударного импульса в публикациях западных исследователей. Метод (приборы) ударного импульса, на наш взгляд, можно рассматривать в качестве переходного этапа от методов упругого отскока и пластической деформации к методу динамического индентирования [57]. Сенсорные элементы приборов данного метода, при соответствующем алгоритме обработки сигнала, позволяют перейти от использования интегральных и амплитудных значений косвенных параметров, к использованию их мгновенных значений.

#### *2.2.4 Кинетическое индентирование*

Косвенные параметры рассмотренных выше методов упругого отскока, пластической деформации и ударного импульса характеризуют лишь либо заключительные стадии процесса индентирования, либо отдельные его моменты, - как в методе ударного импульса. Значительно больше информации о процессе индентирования и, соответственно, - о свойствах контролируемого материала можно было бы получить, регистрируя все стадии процесса внедрения индентора, с учетом скорости приложения нагрузки. Интерес к способам регистрации диаграммы вдавливания индентора в немалой степени стимулируется развитием нанотехнологий, где метод инден-

тирования проявляет себя одним из самых информативных для определения свойств микро- и наноструктур.

Идея перехода от измерения остаточных размеров отпечатка, возникающего под действием приложенной к индентору силы, к непрерывной регистрации диаграммы нагружения принадлежит российским ученым [4, 5, 20]. Метод кинетического индентирования в наибольшей степени разработан для металлов и эластомеров [75]. Но разрабатываемые принципы и методики могут быть успешно использованы и для контроля строительных материалов.

Процесс кинетического индентирования отображается диаграммой в координатах “ $F$ - $\alpha$ ”. На рис. 2.24 приведен характерный вид диаграммы индентирования поверхности упруго-вязко-пластичной среды.

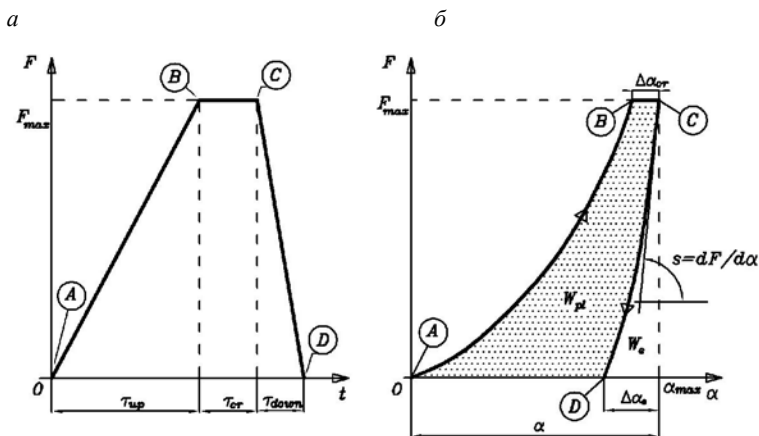


Рис. 2.24 – Диаграммы кинетического индентирования  
*a* – профиль нагружения; *б* – кинетическая диаграмма “ $F$ - $\alpha$ ”:  
 буквы в кружках – характерные точки на кривых нагружения  
 и положения индентора относительно поверхности

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. Затем наступает стадия разгрузки С-Д с постоянной скоростью

стью. Стадия C-D отражает упругое деформирования зоны контакта.

Из анализа размерности величины 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:  $[\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}] = [\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}] \cdot [\text{м}\cdot\text{м}^{-1}] = [\text{Дж}\cdot\text{м}^{-3}]$ . 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  $\alpha$  и максимальное значение силы  $F_{\max}$ , получим реализацию метода пластической деформации. Если иметь 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, 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 A-B 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; наложение колебаний малой амплитуды, многоцикловое нагружение и др., позволяет расширить диагностические возможности метода, повышая его селективность и чувствительность к различным физико-механическим показателям испытываемого материала.

Некоторое внешнее подобие диаграмм внедрения “ $F - \alpha$ ” и испытательных диаграмм растяжения или сжатия “ $\sigma - \varepsilon$ ” образцов материала дают основания предполагать принципиальную возможность их взаимного пересчета. Разумеется, характер напряженно-деформированного состояния (НДС) материала в этих случаях не идентичен, поэтому координата каждой точки диаграммы “ $\sigma - \varepsilon$ ” не может прямо отображаться в точку диаграммы “ $F - \alpha$ ”, а будет являться решением системы уравнений

$$\begin{cases} \varepsilon_i = \psi(\sigma_i, M_i \{\alpha, F\}_n) \\ \sigma_i = \psi(\varepsilon_i, M_i \{\alpha, F\}_n) \end{cases} \quad (2.27)$$

имеющей в качестве переменных массив координат точек этой диаграммы (рис. 2.25).

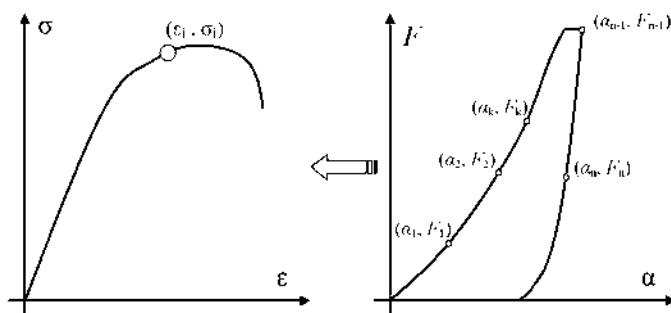


Рис. 2.25 – Взаимосвязь диаграммы “ $\sigma - \varepsilon$ ” и диаграммы кинетического индентирования “ $F - \alpha$ ”

Пример решения такой задачи применительно к металлам представлена в [4, 5]. Методика позволяет из кинетической диаграммы вдавливания шарового индентора получить диаграмму одноосного растяжения материала. Суть методики заключается в многократном решении обратной задачи - моделирования процесса индентирования методом конечных элементов для различных вариантов связей между  $\sigma$  и  $\varepsilon$ , и накопления базы численных решений, с последующим их сопоставлением с реальной диаграммой индентирования. Такой алгоритм требует большого объема предварительных вычислений и может быть реализован на компьютерной основе. Опыт ис-

пользования такого алгоритма для восстановления диаграммы “ $\sigma - \varepsilon$ ” для стали получено [5] расхождение с экспериментальными данными не более 15 %.

Перспективным видится использование для построения системы уравнений (2.28) и ее решения нейросетевых моделей.

### *2.2.5 Динамическое индентирование бетона*

О преимуществах кинетического индентирования говорилось выше. Применительно к вопросам оценки прочностных показателей бетона эти преимущества позволяют раздельно оценить его упругие и прочностные параметры.

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, 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 (рис. 2.6). 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.

Особенностью динамического индентирования 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 (рис. 2.26) 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. На участке 1-2 (рис. 2.26) имеет место упругое деформирование зоны контакта и пластическое смятие бетона. Характер зависимости  $P(x)$  становится более плавным, приближаясь к линейному. После достижения максимальной величины внедрения 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  $x_n$  определяет глубину отпечатка, оставшегося после удара индентора. Информационным является также и участок 2-3 диаграммы, который присущ только процессу динамического деформирования.

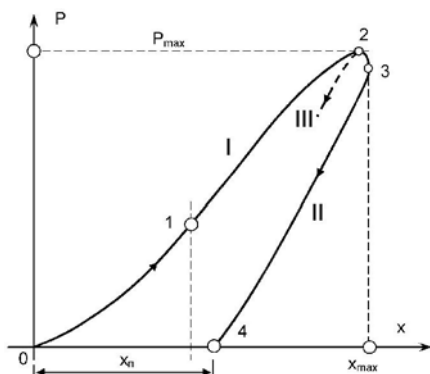


Рис. 2.26 – Зависимость контактного усилия  $P$  от внедрения  $x$  в процессе динамического индентирования бетона

В начальной стадии взаимодействия – участок кривой 0-1 – имеет место упругое взаимодействие сферического индентора с поверхностью бетона. В соответствии с теорией контактного взаимодействия Герца зависимость контактного усилия от внедрения описывается выражением (2.5). Характер участка 2-3 указывает на проявление динамической вязкости бетона, - наблюдается деформирование зоны контакта при снижении контактной силы. Для случая статического (медленного) внедрения индентора в бетон или при отсутствии вязкости бетона этого участка не было бы (рис. 2.24), и этапу разгрузки зоны контакта соответствовал бы участок III диаграммы.

На рис. 2.27, а показан прибор ИПМ-1А метода динамического индентирования разработки ИПФ АН РБ [57, 58], а на рис. 2.27, б структурная схема его измерительного тракта.

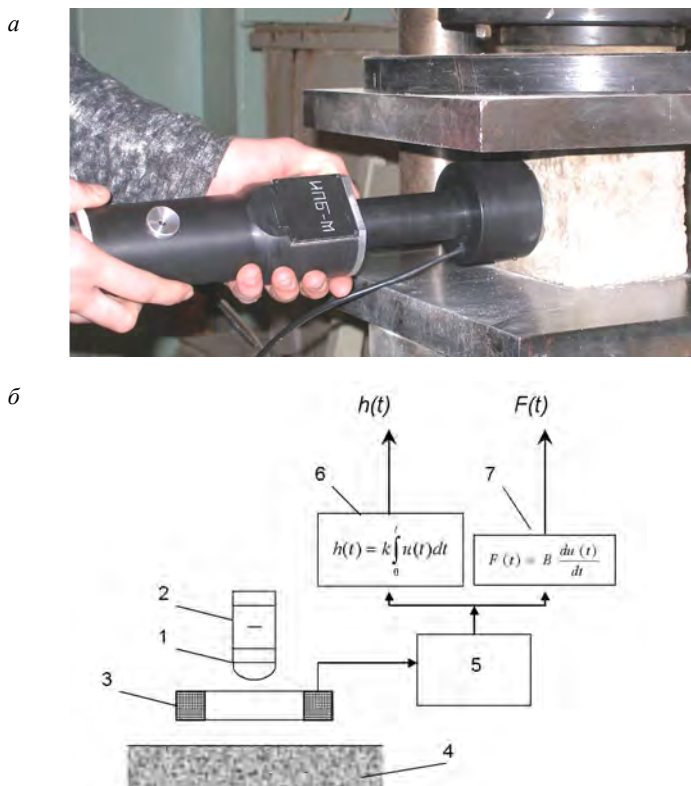


Рис. 2.27 – Прибор ИПМ-1А: а - градуировочные испытания; б - схема измерительного тракта

1 - индентор; 2 – магнит; 3 - катушку индуктивности; 4 – контролируемый участок бетона; 5 - блок усиления и фильтрации; 6, 7 - каналы вычислительного блока

Исходным сигналом прибора является э.д.с., наведенная в катушке индуктивности 3 установленным в инденторе 1 постоянным магнитом 2. Мгновенное значение э.д.с. будет прямо пропорционально мгновенному значению скорости движения  $V$  индентора.

После усиления и оцифровки входного сигнала  $u(t)$ , который прямо пропорционален скорости движения индентора  $V$ , производится расчет в вычислительных блоках 6 и 7 его производной и интеграла по переменной времени  $t$ . Выходной сигнал канала 6  $h(t)$  будет пропорционален величине внедрения  $\alpha$  индентора в бетон. Выходной сигнал  $F(t)$  канала 7, полученный дифференцированием сигнала  $u(t)$ , будет пропорционален ускорению индентора и, соответственно, - силе внедрения.

На рис. 2.28 приведены временные диаграммы сигнала датчика скорости индентора полученные экспериментально при испытании образцов бетона с различными соотношениями модуля упругости и предела прочности на сжатие.

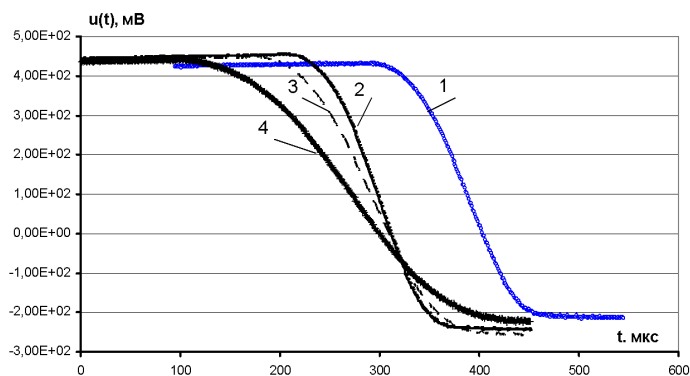


Рис. 2.28 – Временные диаграммы сигнала датчика скорости индентора для бетона с различными соотношениями модуля упругости и предела прочности на сжатие  
 1 –  $E = 43$  ГПа;  $f_{c,cube} = 76$  МПа; 2 –  $E = 39,5$  ГПа;  $f_{c,cube} = 73,5$  МПа;  
 3 –  $E = 22$  ГПа;  $f_{c,cube} = 32$  МПа; 4 –  $E = 14$  ГПа;  $f_{c,cube} = 19$  МПа;

По данным диаграммы  $V=f(t)$  рассчитывается диаграмма зависимости контактной силы  $F$  от глубины вдавливания индентора  $h$  (рис. 2.29, а). Эти же данные позволяют рассчитать зависимость силы внедрения  $F$  от времени  $t$  (рис. 2.29, б), что служит функциональной основой метода ударного импульса (рис. 2.18).



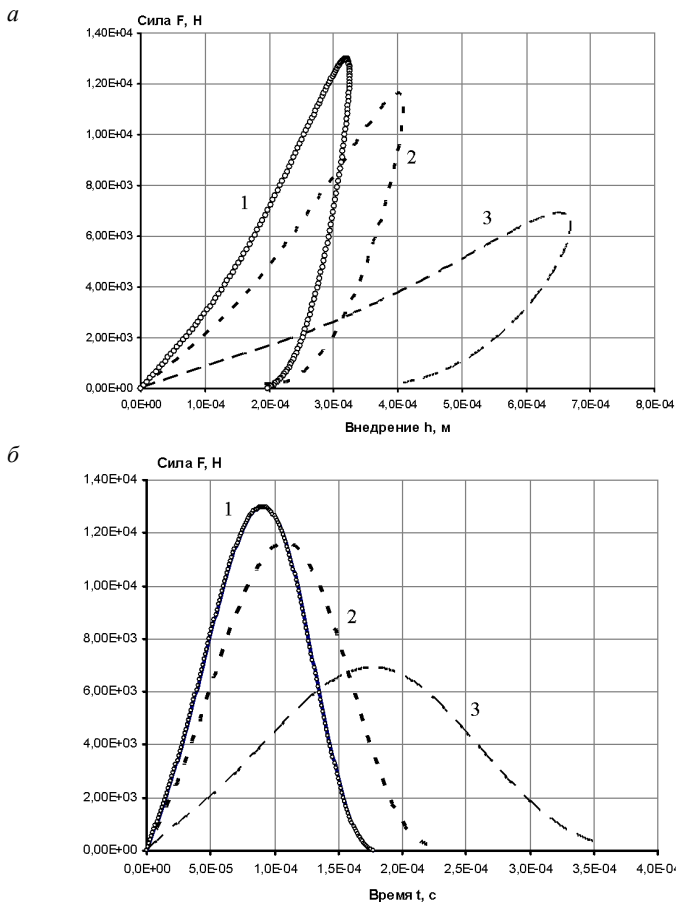


Рис. 2.29 – Экспериментальные диаграммы динамического индентирования  
*a* - зависимость контактной силы от глубины внедрения;  
*б* - зависимость контактной силы от времени

Метод непрерывной регистрации диаграммы вдавливания [58] 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 водится новая характеристика прочности бетона  $HR$ , рассчитываемая из следующего выражения:

$$HR = \frac{HD}{e^n}, \quad (2.28)$$

где  $HD$  - динамическая твердость, рассчитываемая по формуле

$$HD = \frac{P_{\max}}{\pi D \alpha_{\max}}, \quad (2.29)$$

$P_{\max}$  - максимальная сила динамического индентирования;  $n$  - коэффициент, зависящий от диаметра индентора  $D$  и энергии удара  $W$ ;  $e$  - коэффициент восстановления скорости индентора

$$e = V_0 / V_{\text{end}}, \quad (2.30)$$

$V_0$  - скорость индентора до соприкосновения с поверхностью бетона;  $V_{\text{max}}$  - скорость индентора непосредственно после контакта с поверхностью.

Для прибора ИПМ-1Б (рис. 2.27), использовавшегося при проведении экспериментов,  $D = 32$  мм,  $W = 1,4$  Дж, коэффициент  $n$  составил 0,75.

Динамическая твердость определяется по данным непрерывной регистрации параметров внедрения сферического индентора.

По динамической твердости и коэффициенту восстановления скорости индентора можно определить динамический модуль упругости [58].

$$E_d = \frac{1 - \nu_2^2}{\left( 1,12 \left( \frac{2+n}{2} \right)^{\frac{3}{4}} \frac{D^{\frac{3}{4}} HD^{\frac{5}{4}}}{W_0^{\frac{1}{4}}} \right) \cdot e^2 - \frac{1 - \nu_1^2}{E_1}}, \quad (2.31)$$

где  $e$  - коэффициент восстановления скорости индентора;  $D$  и  $W_0$  - диаметр и предупредительная энергия индентора;  $n$  - коэффициент, характеризующий способность бетона к упрочнению;  $\nu_1$  и  $E_1$  - коэффициент Пуассона и модуль упругости материала индентора,  $\nu_2$  - коэффициент Пуассона бетона.

Зависимости (2.29) и (2.31) являются, по существу, алгоритмом комбинированного многопараметрового контроля. Коэффициент восстановления скорости индентора  $e$ , в большей степени, чем дру-

гие параметры индентирования, характеризует упругие свойства материала. Показатель  $HD$  обладает, по данным [58], высокой чувствительностью к прочности бетона на одноосное сжатие  $f_c$ . Поэтому учет в формуле (2.29) коэффициента восстановления скорости индентора позволяет скомпенсировать влияние на оценку прочности бетона неоднозначно связанного с ней модуля упругости

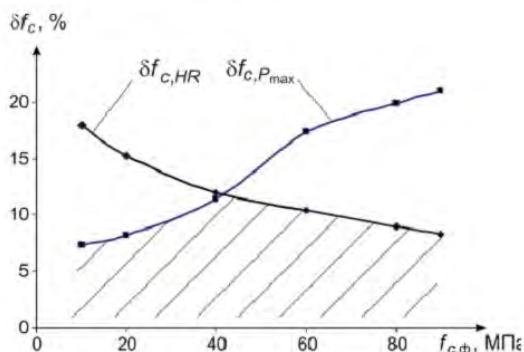


Рис. 2.30 – Зависимости величины  $\delta f_c$  от фактической прочности бетона  $f_c$   
 $\delta f_{c,P_{max}}$  – погрешность определения прочности по контактному усилию  
 $\delta f_{c,HR}$  – погрешность определения прочности по характеристике  $HR$

Представленные данные испытаний показывают рост эффективности предложенной методики при контроле бетонов высокой прочности, - при  $f_c > 40$  МПа. На рис. 2.30 приведены зависимости показателя разброса оценок прочности, полученные при использовании в качестве косвенного параметра показатель  $HR$  и значение максимальной силы индентирования  $P_{max}$

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.

На рис. 2.31 приведены данные [58] совместных испытаний бетонных образцов при экстремальных термических воздействиях.

Таким образом, конструкция прибора ИПБ-1/2 может рассматриваться как универсальная аппаратная база для реализации контроля методом динамического индентирования, который в свою очередь, при соответствующем программном обеспечении, позволяет созда-

вать «виртуальные» приборы метода пластической деформации, упругого отскока и ударного импульса.

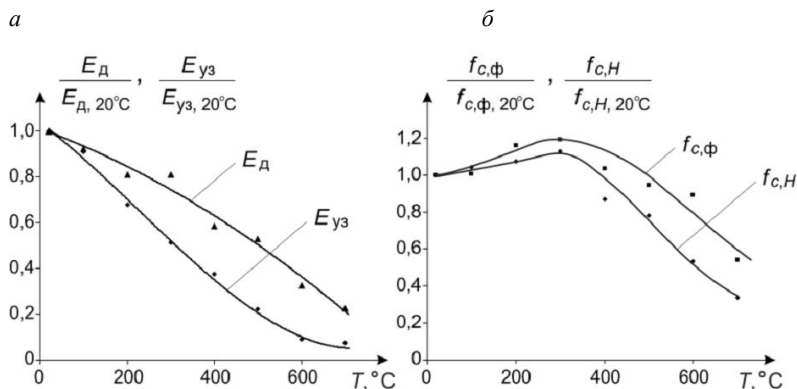


Рис. 2.31 – Влияние температуры на относительное изменение модуля упругости (а) и прочности (б) бетона

*а:  $E_d$  и  $E_{yz}$  – модуль упругости, измеренный соответственно динамическим и ультразвуковым методами; б:  $f_{c,Н}$  и  $f_{c,ф}$  – прочность, полученная соответственно динамическим методом и разрушающими испытаниями*

\*\*\*

Сложившаяся классификация ударных (склерометрических) методов отражает не столько физику измерительного процесса, сколько постепенное расширение возможностей исследователей и конструкторов приборных средств, в использовании выбранных ими информационных параметров сенсорных элементов. Связь же выбранных косвенных параметров с физико-механическими свойствами бетона остается при этом в «тени» и устанавливается подбором эмпирических зависимостей в ходе испытаний и эксплуатации уже готового прибора. Если в «доэлектронный» период развития приборных средств измерить можно было лишь некоторые механические параметры: размеры отпечатка, высоту отскока, то современная измерительная технология изменилась кардинально: измерить можно всё (или почти всё). Сложность заключается в удачном выборе системы косвенных параметров в максимальной степени адекватной прочностным или иным физико-механическим свойствам бетона.

Если в качестве «истинного» значения прочности бетона рассматривать результаты разрушающих испытаний образцов (кубов, призм, цилиндров), то в наибольшей степени адекватными им в своих оценках являются методы локальных разрушений. Важнейшим достоинством данной группы методов является слабая подверженность их оценок прочности влиянию технологических факторов бетона: изменения состава, условий укладки и режима твердения. Это позволяет рекомендовать 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.

Приборы ударных механических методов являются измерителями параметра (группы параметров) ударного взаимодействия твердосплавного индентора с поверхностью бетонного изделия. Измеряемый параметр является отображением комплекса величин, включая прочность бетона (предельное напряжение) и характеристики его упругости и пластичности. Степень превалирования тех или иных характеристик бетона в полученном значении косвенного параметра зависит от ряда факторов, в первую очередь к ним относятся: энергия удара, масса индентора и площадь его взаимодействия с бетоном. Указанные физико-механические характеристики, их соотношения различны для бетонов разных составов и технологий, в силу чего и оценки «качества» бетона, полученные ударными методами приобретают неопределенность. Сужение диапазона неопределенности может быть достигнуто двумя путями. Первый – традиционным использованием «букета» градуировочных зависимостей и поправочных коэффициентов, учитывающих изменения состава и технологии бетона. Второй – селекцией механических характеристик бетона использованием «тонких» методик измерения либо методом комбинирования, с включением в измерительный комплекс методов обладающих иной степенью чувствительности к механическим характеристикам бетона, например ультразвукового импульсного метода. Потенциально, второй путь позволяет подойти к созданию безобразцовых методов и приборов контроля механических свойств бетона.

### ГЛАВА 3

## АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Акустические методы испытаний бетонных и железобетонных конструкций основаны на зависимости параметров распространяющихся в них упругих волн как от интегральных упругопрочностных показателей бетона – модуля упругости  $E_c$  и прочности на сжатие  $f_c$ , так и от наличия и локализации макродефектов в массиве конструкции, и от концентрации и характера структурных микродефектов.

Акустические методы в своем современном виде являются низкоэнергетическими. Упругая деформация бетона в зоне излучающего преобразователя для типовых ультразвуковых приборов составляет (5...20) мкм, а в зоне распространения и приема на несколько порядков меньше. Оценить порядок энергетического воздействия типового ультразвукового излучателя на бетон можно исходя из следующих соотношений

$$\sigma_{US,max} \approx \frac{\Delta u}{\lambda/4} E_c, \quad (3.1)$$

$$q_{US,max}^* \approx 16f \frac{\Delta u^2}{\lambda} E_c, \quad (3.2)$$

где  $\sigma_{US,max}$  – максимальное напряжение, [Н·м<sup>-2</sup>];  $q_{US,max}^*$  – максимальная мощность в единице объема, [Дж·м<sup>-3</sup>];  $E_c$  – модуль упругости, [Н·м<sup>-2</sup>];  $\lambda$  – длина волны колебаний, [м];  $f$  – частота колебаний, [с<sup>-1</sup>];  $\Delta u$  – амплитуда смещения частиц бетона, [м].

Подставив в формулы (3.1) и (3.2) типичные значения параметров:  $\Delta u = 10^{-5}$  м,  $E_c = 25 \cdot 10^9$  Па;  $f = 10^5$  Гц,  $\lambda = 4 \cdot 10^{-2}$  получим

$$\sigma_{US,max} \approx \frac{10^{-5}}{4 \cdot 10^{-2}/4} 25 \cdot 10^9 = 25 \cdot 10^6, \text{ Па};$$

$$q_{US,max}^* \approx 16 \cdot 10^5 \frac{(10^{-5})^2}{4 \cdot 10^{-2}} 25 \cdot 10^9 = 10^8, \text{ Дж/м}^3.$$

Для сравнения рассчитаем эти же параметры для молотка Шмидта типа  $N$ , - энергия удара 2,207 Дж. Примем радиус эффективной области упруго-пластического деформирования бетона – 1,5 см, что соответствует объему  $0,99 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ . Время взаимодействия –  $10^{-3} \text{ с}$ . В этом случае максимальная мощность в единице объема составит  $q^*_{Sh,max} \approx 2,2 \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$ , что более, чем на порядок превосходит этот показатель для ультразвука. Максимальное напряжение в зоне контакта индентора молотка Шмидта в 4...8 раз больше, чем  $\sigma_{US,max}$ . При этом следует иметь в виду, что для излучающего преобразователя с точечным сухим контактом реальные силовые и энергетические показатели будут значительно ниже из-за влияния гибкости самого контакта и малых его размеров – долей квадратного миллиметра. Рассчитанное значение  $\sigma_{US,max}$  и выраженные макронелинейные эффекты будут 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, - свободных колебаний, Impact-Echo, то в зоне ударной инициации колебаний напряжения и удельная мощность соизмеримы с показателем 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 оказывают заметного влияния на распространение акустических волн. Напряжения в зоне распространения волн 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 его упругими свойствами.

В таблице 3.1 приведены характеристики основных типов упругих волн. В практике испытаний бетонных и железобетонных конструкций получили применение, в основном, продольные (волны сжатия) и сдвиговые - поперечные волны.

Таблица 3.1 - Характеристики основных типов упругих волн

1 Среда распространения	2 Тип (название волны)	3 Характеристика волны	4 Скорость распространения
Жидкость или газ	Продольные (растяжения сжатия)	Периодические расширения и сжатия среды	$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$
Безграничное твердое тело	Продольные (растяжения сжатия)	Частицы колеблются в направлении распространения волны	$c_l = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$
	Поперечные (сдвига, эквивалентные)	Частицы колеблются в плоскости перпендикулярной направлению распространения волны	$c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} \approx 0,55 \cdot c_l$
Поверхность полубезграничного тела	Поверхностные (Релея)	Волна распространяется по поверхности тела	$c_s = \frac{0,85 + 1,12\nu}{1 + \nu} \cdot c_l \approx 0,93c_l$
	Головные (продольные подповерхностные, поперечные)	Быстро затухают вдоль поверхности вследствие переизлучения, порождая поперечные волны	$c_h = c_t$



Продолжение таблицы 3.1			
1	2	3	4
Бесконечная пластина толщиной $h$	Нормальные несимметричные (изгибные, Лэмба)	Изгиб пластины со сдвигом	$c_{pa} = \frac{\pi \cdot h}{\lambda} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}} \quad (\lambda \gg h)$
	Нормальные симметричные (нормальные расширения-сжатия, Лэмба)	Продольные колебания с изменением поперечных размеров	$c_{pr} \approx \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (\lambda \gg h)$
Бесконечный стержень диаметром $d$	Изгиба	Изгиб стержня со сдвигом	$c_{Ba} \approx \frac{\pi d}{2\lambda} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\lambda \gg d)$
	Продольные (растяжения-сжатия)	Продольные колебания с изменением поперечных размеров	$c_{Bs} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = c_0 \quad (\lambda \gg d)$
	Радиальные	Продольные волны в радиальном направлении	$c_{BR} = c_1$
Бесконечный стержень или труба	Крутильные	Вращение элементов вокруг оси стержня	$c_{BT} = c_2$
Примечание – $K$ – модуль всестороннего сжатия; $E$ – модуль упругости; $\nu$ – коэффициент Пуассона			

Надо заметить, что действующие нормативы, регламентирующие акустический контроль не оговаривают тип используемых волн. Но фактически, поперечные волны используются в настоящее время 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 осуществляется силовым (импульсным или квазигармоническим с небольшим числом периодов) воздействием на небольшую по площади область поверхности изделия (см. гл. 5). 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 (табл. 3.1) распространяется продольная волна. Именно по этой причине продольная волна чаще всего и используется для диагностики.

### *3.1 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

$$f_{1,T} = \frac{c}{2T}, \quad (3.3)$$

где  $c$  – скорость распространения упругой волны в контролируемом материале.

Метод свободных колебаний достаточно распространен в практике лабораторных испытаний изделий и образцов материалов. В этом случае часто используют продольные, сдвиговые, изгибные и крутильные колебания. Возбуждение затухающих изгибных и продольных колебаний может осуществляться нанесением легких ударов по боковым (для изгибных колебаний), либо - торцевым граням образца. Непрерывные колебания возбуждаются специальным активатором, обычно электромагнитного или электродинамического типа, воздействующим на образец сосредоточенной силой, изменяющейся по гармоническому закону. На рисунке 3.1 приведена схема измерения параметров изгибных колебаний.

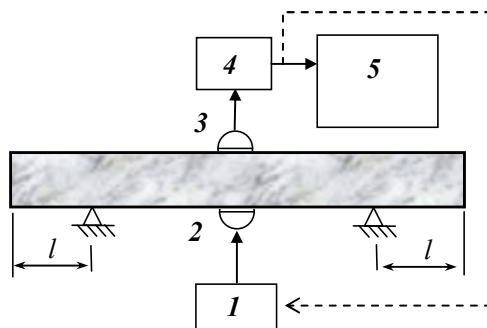


Рис. 3.1 – Схема измерения частоты резонансных, изгибных колебаний бетонного образца

1 – генератор переменного напряжения; 2 – инициатор колебаний;  
3 – приемный преобразователь; 4 – усилитель; 5 - регистрирующий прибор  
(осциллограф/частотомер)

Опорные элементы ножевого типа с эластичными выступами устанавливаются симметрично относительно центра образца, в зонах узлов изгибных колебаний, на расстоянии от торцов  $l=0,224L$  ( $L$  – длина образца). Максимальная амплитуда принимаемого сигнала, при неизменном уровне возбуждения, будет иметь место при равенстве частоты возбуждения  $f_{\Gamma}$  и собственной частоты  $f_0$  образца. В этом случае, динамический модуль Юнга  $E_0$  может быть определен из соотношения [52]:

$$E_0 = 0,0789 \frac{f_0^2 \cdot L^4 \cdot \rho \cdot q}{i^2 \cdot 981}, \quad (3.4)$$

где  $L$  – длина образца, см;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $i$  – радиус инерции в плоскости сечения образца, см;  $q$  – коэффициент, зависящий от отношения размера образца в плоскости колебаний к его длине.

Введение обратной связи между приемным преобразователем и вибратором - показана на рис. 3.1 штриховой линией - позволяет создать в системе непрерывные автоколебания на резонансной частоте.

Резонансный метод используется для лабораторных испытаний образцов и изделий простой формы: призм, цилиндров, стержней. Применение метода на строительной площадке для контроля конструкций затруднено рядом причин, главной из которых является сложность анализа колебательной системы образованной большим числом механически взаимодействующих конструктивных элементов строительного объекта. Армирование конструкций усугубляет ситуацию. Создание расчетными методами точных динамических моделей связанных систем из армированных бетонных конструкций различной геометрии и с различными механическими характеристиками представляет собой нетривиальную задачу даже при использовании современных средств вычислительной техники. Следует заметить, что ни один из методов свободных колебаний применительно к бетону не нормирован на территории стран СНГ. Тем не менее, анализ частотных характеристик групп элементов или всего объекта в целом может оказаться эффективным при обнаружении дефектов сплошности бетонного массива, для оценки жесткости конструкций, соответствия их механических характеристик заданным требованиям.

### *Impact-Echo метод (ИЕМ)*

Наиболее простой вариант метода свободных колебаний - так называемый *Impact-Echo* метод (ИЕМ). Несмотря на присущие ему недостатки, ИЕМ приобрел немалую популярность в Германии, Англии, Японии, Чехии и США [103, 104, 107, 123]. 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 (рис. 3.2).



Рис. 3.2 – 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 колебаний (рис. 3.6). Для визуализации акустического сигнала и его анализа, как правило, используют спектральные методы, и соответствующие компьютерные программы на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ).



Рис. 3.3 – Возбуждение колебаний механическим ударом

Возбуждение колебаний в бетоне обычно производится специальным ударным механизмом, либо вручную, - нанесением удара

металлическим шариком малой массы по поверхности конструкции (рис. 3.3). Прием колебаний осуществляется пьезоэлектрическими или электродинамическими датчиками (рис. 3.4). 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 со скоростью распространения продольной волны  $c$  и расстоянием  $T$  соотношением (3.3).

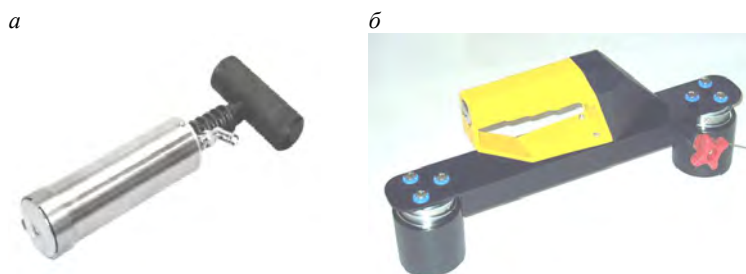


Рис. 3.4 – Приемные акустические преобразователи: *а* – цилиндрический, для выявления неоднородностей и оценки упруго-прочностных характеристик бетона; *б* – двудольный, для оценки скорости акустической волны (<http://www.impact-echo.com>)

На рис. 3.5 показан «снимок» волнового процесса в плите без дефектов, построенный по данным КЭ моделирования на момент, когда фронт импульса поперечной волны достиг донной поверхности плиты. К этому моменту фронт продольной волны отраженной от дна уже находится в середине изделия. Хорошо заметен лидирующий фронт импульса падающей продольной волны. На рис. 3.5 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.

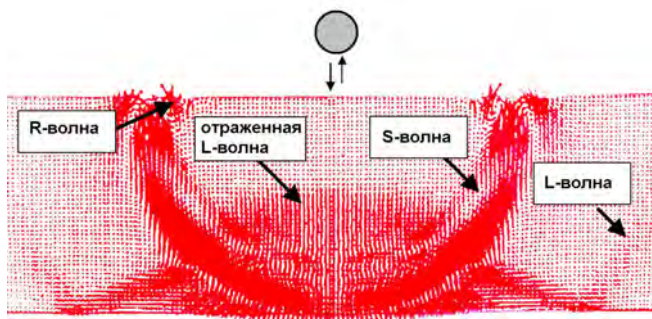


Рис. 3.5 – Акустическое поле в зоне ударного возбуждения колебаний

В зависимости от размеров и формы изделия, упругих свойств бетона, присутствия крупных дефектов, а также массы ударника изменяется частотный спектр отклика, меняются временные параметры отдельных его 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  $d$ ,

$$f_{1,d} = \frac{c}{2d}, \quad (3.5)$$

а амплитуда зависит главным образом от размеров, формы и ориентации по отношению к фронту волны (рис. 3.6):

На рис. 3.7 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 20500 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.

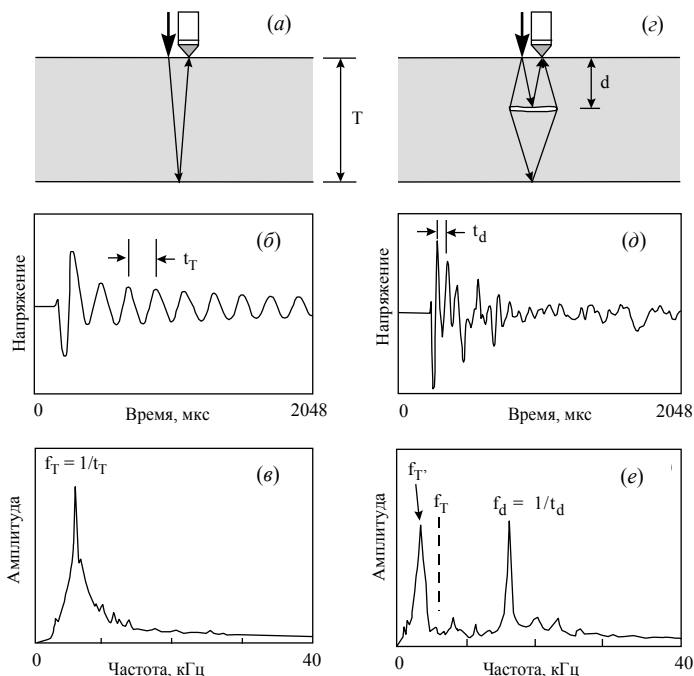


Рис. 3.6 – Сравнение акустического отклика при отсутствии дефекта в зоне контроля (слева) и при наличии дефекта (справа): *а, с* – схемы контроля; *б, д* – временные диаграммы сигналов откликов; *е, ф* – частотные спектры сигналов

Распространение и распределение упругих деформаций в объеме контролируемой конструкции при ударном возбуждении является нестационарным процессом. В момент удара сферического индентора 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 исходя из соотношений теории Герца (см. гл. 2) по формуле [26],

$$\tau_c = 2.87 \cdot \left( \frac{m^2}{R \cdot E^* \cdot V_Z} \right)^{1/5}, \quad (3.6)$$



где  $m$  – масса сферического ударника;  $R$  – его радиус;  $E^*$  - приведенный модуль упругости, определяемый по формуле (2.2);  $V_z$  – скорость сближения.

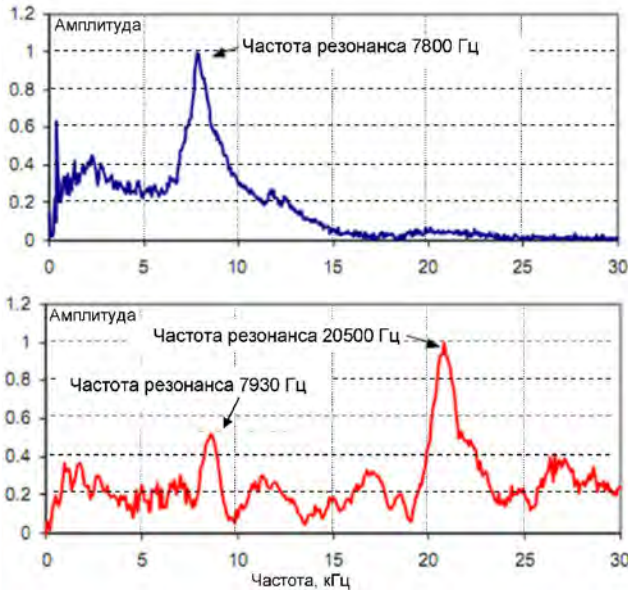


Рис. 3.7 – Частотные спектры акустических откликов для монолитной плиты перекрытия толщиной 25 см в бездефектной зоне (верхняя диаграмма), и в зоне расслоения бетона (нижняя диаграмма)

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  $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ :

$$\tau_c = 2.87 \cdot \left( \frac{(4.1 \cdot 10^{-3})^2}{5 \cdot 10^{-3} \cdot (30 \cdot 10^9)^2 \cdot 1} \right)^{1/5} = 5,91 \cdot 10^{-5} \text{ , с.}$$

Характеристическая частота  $f_{\text{max}}$ , соответствующая максимуму частотного спектра, составит  $f_{\text{max}} = 1/(2 \cdot \tau_c) = 8,46 \text{ кГц}$ . 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

$$T = V_l \cdot \tau_c = 4000 \cdot 5,9 \cdot 10^{-5} \approx 24 \cdot 10^{-2}, \text{ м.}$$

В рассмотренном примере режим стоячей квазигармонической волны установится за пару периодов. В бетонном изделии, имеющем толщину значительно бóльшую, 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. Это значит, что 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 оборотную сторону, - чем ниже частота акустических колебаний, тем большего размера должен быть дефект для создания эффекта отражения и образования стоячей волны. 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. 3.8) в виде сектора с вершиной в точке возбуждения зондирующих колебаний.

Для обнаружения малоразмерных дефектов на большой глубине используют ультразвуковые дефектоскопы [122, 126, 127]. В этих приборах используется принцип импульсной локации волнами, длина которых составляет 3...8 сантиметров.

Измерительный тракт приборов ИЕМ, наряду с частотными, позволяет измерять временные параметры акустического сигнала. Такой режим измерений возможен, если длина инициируемой волны значительно меньше габарита изделия в направлении контроля. Используются два приемных преобразователя (рис. 3.4,б), устанавливаемых на одной линии с точкой возбуждения импульса. Информационным параметром является временной интервал между моментами регистрации импульса каждым из преобразователей. Такая методика позволяет определить скорость распространения импульса подповерхностной и поверхностной волн.

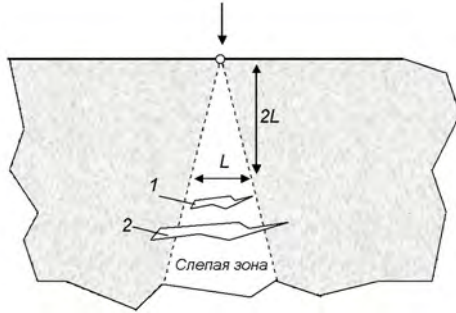


Рис. 3.8 – Рабочая область ИЕ метода  
 1 – дефект с малой вероятностью обнаружения;  
 2 – обнаруживаемый дефект

Оценка глубины поверхностных трещин ИЕМ может производиться путем сравнения времени прохождения фронта волны для бездефектной зоны и в зоне трещины (рис. 3.9). 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 [85]

$$D = \frac{AC}{2} \sqrt{\left(\frac{t_2}{t_1} - 1\right)^2}. \quad (3.7)$$

На рис. 3.10 показана схема трансформации фронтов волны в зоне трещины.

Фронт волны инициированной ударом  $p$  отражается от плоскости трещины  $p_c$  и переизлучается  $p_d p$  от её вершины.

Определение прочности бетона производится по скорости прохождения импульса, на основе градуировочных зависимостей, аналогичных зависимостям ультразвукового импульсного метода.

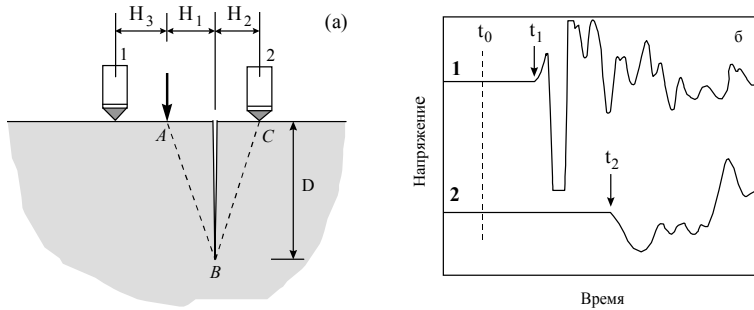


Рис. 3.9 – Оценка глубины поверхностных трещин ИЕ методом

Имеются публикации о сравнительных испытаниях ультразвукового импульсного и ИЕМ, и о совместном их использовании для обнаружения и локализации дефектов в бетоне [107, 108].

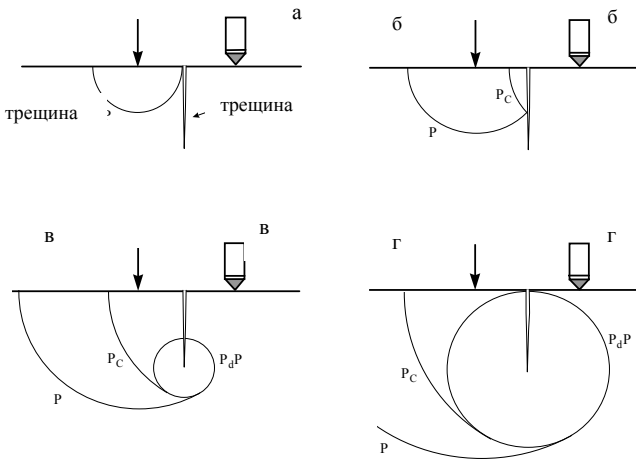


Рис. 3.10 – Схема дифракции волны в зоне раскрытия трещины

В сравнении с ультразвуковым импульсным методом прохождения, который позволяет обнаружить при одностороннем доступе к бетонному изделию лишь поверхностные и подповерхностные пустоты/трещины, ИЕМ обладает бесспорными преимуществами, надежно обнаруживая и скрытые дефекты. В оценке прочности и параметров упругости бетона оба метода дают близкие оценки [107].

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 (см. гл. 5, 7), а значит и в оценке их скорости распространения, и связанных с ней физико-механических параметров бетона. Кроме того, длинноволновый акустический сигнал ИЕ метода в меньшей степени подвержен частотной дисперсии скорости распространения из-за структурной неоднородности бетона.

ИЕМ успешно конкурирует с методом ультразвуковой дефектоскопии бетона, позволяя выявлять скрытые под поверхностью дефекты – трещины, зоны недоуплотнения, расслоения бетона. Несмотря на то, что разрешающая способность ИЕМ, его возможности пространственной локализации одиночных дефектов и максимальная глубина «зондирования» заметно хуже, но 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.

Имеются данные использования метода для оценки нарастания прочности бетона в процессе тепловой обработки [108]. В качестве информационного параметра рассматривалась динамика перераспределения спектральной плотности акустического сигнала. На рис. 3.11 приведен пример спектрограммы процесса твердения бетона (по данным [108]). Для основной частоты  $f_{RC}$  характерны те же стадии, что и для скорости ультразвуковых продольных волн, с которой она однозначно связана. Но, в дополнение к этому, по мере созревания бетона наблюдается также постепенное обогащение спектра отклика высокочастотными составляющими.

Интерпретация такого рода данных контроля (рис. 3.7, рис. 3.11) требует высокой квалификации и опыта оператора и, во многих случаях, не дает однозначных оценок состояния бетона. Кроме того, открытым остается вопрос о влиянии армирования бетона на оценки метода. Определенные надежды связываются с алгоритми-

зацией обработки вейвлет-спектров с привлечением теории распознавания образов.

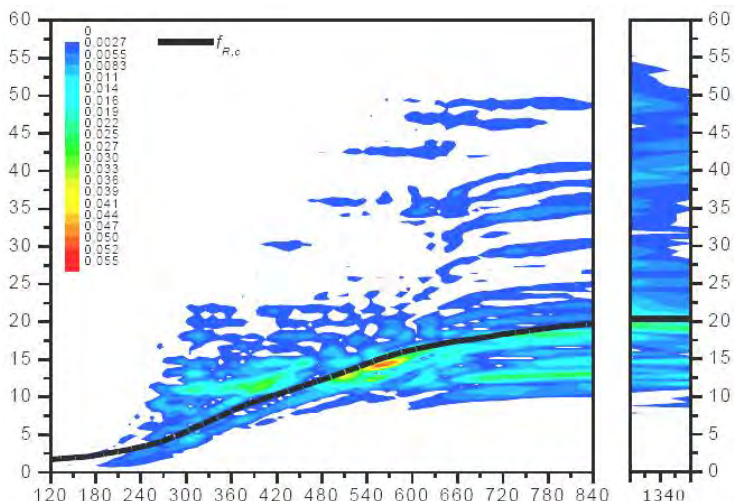


Рис. 3.11 – Спектрограмма акустического отклика в процессе твердения бетонного образца

*на горизонтальной оси отсчеты времени твердения образца, мин.;  
на вертикальной – частота, кГц; градации плотности изображения  
соответствуют амплитуде спектральных составляющих;  
сплошной черной линией  $f_{R,c}$  показана кривая для основной частоты спектра*

### 3.2 Методы частотного анализа акустических сигналов Фурье-спектр

Для анализа динамических процессов, в том числе и процессов распространения волн, широко используются спектральные методы, позволяющие рассматривать процесс не во временной области развития, а в частотной. В основе спектральных методов лежит преобразование Фурье (ПФ).

$$F(\omega) = \int f(t) \cdot \exp(-i\omega t) dt, \quad (3.8)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int F(\omega) \cdot \exp(-i\omega t) d\omega, \quad (3.9)$$

где  $F(\omega)$  – преобразование Фурье (частотный спектр);  $f(t)$  – исходный сигнал во временном представлении;  $\omega$  – круговая частота.

Выражение (3.8) – прямое преобразование Фурье, выражение (3.9) – обратное преобразование. Математический смысл преобразования Фурье состоит в представлении сигнала  $f(t)$  в виде бесконечной суммы синусоид и косинусоид. Обратное преобразование Фурье переводит спектральное отображение  $F(\omega)$  в исходный сигнал  $f(t)$ . Для преобразования Фурье разработан эффективный алгоритм, получивший название быстрое преобразование Фурье (БПФ), реализуемый во многих программах математической обработки данных (Excel, MathCad и др.). В отличие от классического преобразования (3.8), рассматривающего исходный сигнал в непрерывной области аргумента от  $-\infty$  до  $+\infty$ , БПФ позволяет получить частотный спектр сигнала  $f(t)$  при наличии  $2^N$  числа его отсчетов. БПФ дает массив значений амплитуд частотных составляющих  $F(\omega_i)$  сигнала, которые, в общем случае, являются комплексными величинами, имеющими действительную  $Re[F(\omega_i)]$  и мнимую  $Im[F(\omega_i)]$  составляющие. Для графического отображения, так называемого амплитудно-частотного спектра обычно используют модуль комплексных амплитуд, принимающий только положительные значения

$$Mod[F(\omega_i)] = \{Re^2[F(\omega_i)] + Im^2[F(\omega_i)]\}^{-2}. \quad (3.10)$$

Эта процедура делает результат спектрального преобразования наглядным. Во многих практических применениях БПФ, в первую очередь для анализа стационарных, мало изменяющихся во времени сигналов, этого достаточно. Получение амплитудно-частотного спектра сигналов, у которых соотношение частотных составляющих изменяется за время его существования, а именно такие сигналы используются во многих акустических методах испытаний, приводит к потере информации о временных параметрах частотных составляющих. Эта информация косвенно содержится в фазовом частотном спектре сигнала

$$\varphi(\omega_i) = \arctg\{Im[F(\omega_i)]/Re[F(\omega_i)]\}, \quad (3.11)$$

но для временного анализа фазочастотный спектр неудобен.

На рис. 3.12 показаны амплитудно- и фазочастотные спектры, полученные алгоритмом БПФ, двух сигналов, состоящих из последовательности синусоид с частотами 25 и 50 Гц.

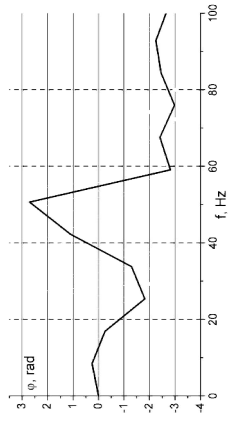
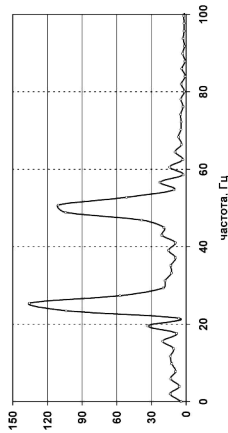
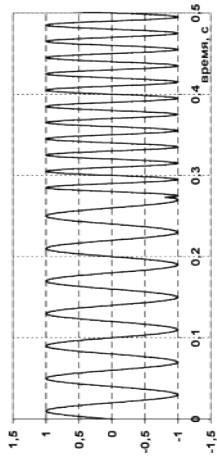
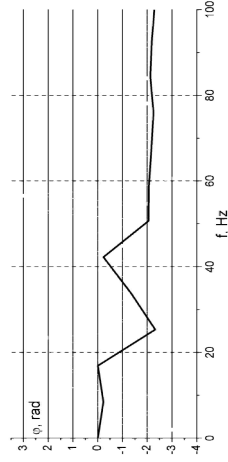
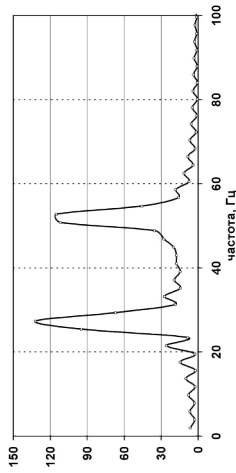
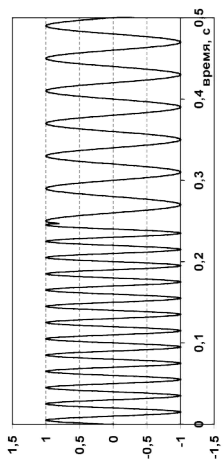


Рис. 3.12 - Амплитудные и фазовые частотные спектры гармонических сигналов



Сигналы отличаются порядком следования составляющих во времени. Частота получения отсчетов – 1000 Гц, количество отсчетов  $n = 512$  ( $2^9$ ). Если судить о характере сигнала по амплитудно-частотным спектрам, то можно сделать неверное заключение, что сигналы идентичны, так как их спектры совпадают. Фазочастотные спектры имеют отличия, но сделать по ним заключение о временных соотношениях между составляющими сигнала затруднительно. Таким образом, ПФ дает информацию о частотном наполнении сигнала, но не позволяет определить, в какой момент времени появляется и как долго присутствует та или иная частотная составляющая. Это обстоятельство заставляет исследователей искать альтернативные варианты преобразований сигналов.

### 3.3 Вейвлет преобразование (*wavelet transform*)

Вейвлет преобразование (ВП) позволяет осуществить частотно-временное представление сигнала. Оно является относительно новым направлением в обработке сигналов [110, 111, 119]. Развитие теории и приложений (ВП) продолжается в различных областях. Оно применяется, главным образом, для анализа нестационарных сигналов, и для многих задач подобного рода оказывается более эффективным, чем преобразование Фурье. К нестационарным сигналам относятся импульсные сигналы акустических методов испытаний, в том числе, ультразвукового импульсного (см. гл. 4), ИЕ и других методов свободных колебаний. Основным отличием вейвлетного преобразования является разложение сигнала не по синусоидам (как для преобразования Фурье), а по другим функциям, называемым вейвлетобразующими. Вейвлетобразующие функции, в отличие от бесконечных синусоид, локализованы в некоторой ограниченной области своего аргумента, а вдали от нее равны нулю или ничтожно малы. Пример такой функции, называемой "мексиканской шляпой", показан на рис. 3.13. Вейвлет-спектр

$$f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (3.12)$$

где  $\Psi$  – вейвлетобразующая функция;  $a$  – масштабная переменная, связанная с частотой соотношением  $\omega = \omega_0/a$ ;  $\omega_0$  – положитель-

ная константа;  $b$  – параметр, имеющий размерность времени, в отличие от ПФ имеет два аргумента.

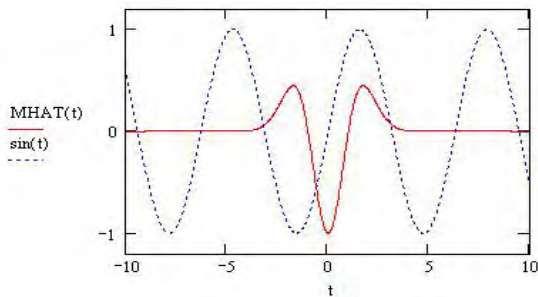


Рис. 3.13 – Синусоида и вейвлетобразующая функция

Помимо частоты, вторым аргументом  $b$  является место временной локализации вейвлетобразующей функции. Поскольку вейвлет спектр является функцией двух переменных, то для его отображения используют либо трехмерную систему координат, либо используют цветное или яркостное отображение спектральных составляющих.

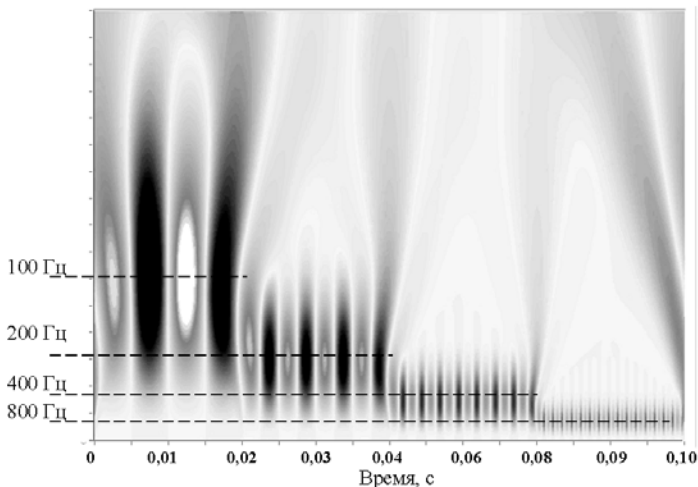


Рис. 3.14 – Вейвлет спектр сигнала из последовательности синусоид с частотами 100, 200, 400 и 800 Гц

На рис. 3.14 показан вейвлет – спектр сигнала из последовательности синусоид с частотами 100, 200, 400 и 800 Гц одинаковой длительности 0,02 с.

### 3.4 Виброакустический метод

Как уже указывалось, ИЕМ распространен в США и некоторых странах западной Европы. В странах СНГ этот метод в настоящее время не имеет нормативной поддержки. Данные о его использовании в строительной практике отсутствуют. В странах СНГ получил распространение аналог ИЕМ, - виброакустический метод, которым (если отвлечься от формально-юридической стороны вопроса) является и сам ИЕМ. Приборы диагностики свай «Спектр-1/2/3» являются упрощенными версиями приборов ИЕ метода. Упрощение определяется меньшим измерительным диапазоном – максимальная частота рабочего спектра прибора «Спектр-3.0» – 23 кГц, что, судя по конструктивному исполнению с использованием планшетного компьютера, связано с использованием «штатных» звуковых средств самого компьютера, частотный диапазон которых обычно ограничен значениями 22...25 кГц. Поэтому основное использование приборов этого типа – контроль дефектности протяженных изделий: свай, колонн и других, для контроля которых эффективны низкочастотные зондирующие сигналы (рис. 3.15).

Если для спектрального ИЕ метода при контроле массивных изделий важное значение имело соотношение размера дефекта и расстояние от него до поверхности изделия (рис. 3.8), то при контроле свай и других, подобных по геометрии изделий, имеет значение соотношение между размером дефекта и размером сечения сваи. Для виброакустического метода свая играет роль акустического волновода, размеры сечения которого меньше длины волны зондирующего импульса. В этом случае акустический импульс практически не претерпевает геометрического рассеивания и может распространяться на большое расстояние – десятки метров. Ориентировочно определить верхнее значение частоты  $f_{max}$  зондирующего импульса можно из соотношения (3.3). Для сваи сечением 200x200 мм  $f_{max} = c/2 \cdot 0,2 \approx 40$  кГц. Рабочее значение частоты берется в несколько раз меньше, что вписывается в частотный диапазон приборов этого метода. Реальная «дальнобойность» метода будет зависеть от

концентрации в объеме бетона структурных неоднородностей и дефектов, на которых происходит рассеивание и поглощение энергии импульса. Большое значение также имеют механические характеристики грунта и состояние поверхности сваи.

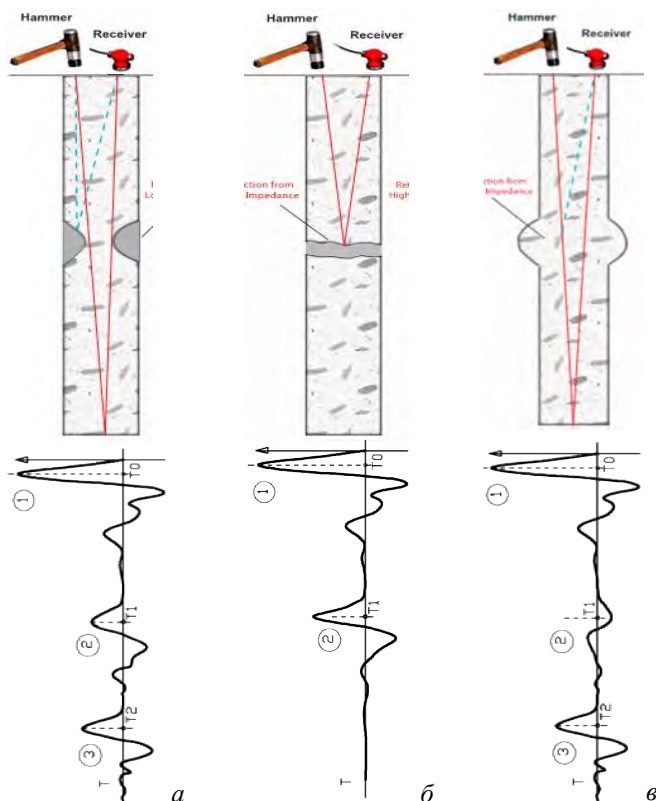


Рис. 3.15 – Акустические отклики при различных типах дефектов свай

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 излучателя. 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 ( $\sim 3500..4000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) и расстояния от головы сваи до дефекта по формуле (3.5). Фаза принятого отраженного импульса – в момент времени  $T_1$  (рис. 3.15, а и 3.15, в) - будет зависеть от характера дефекта. Как и для ИЕМ, возможно временное и частотно-спектральное отображение принимаемого акустического сигнала.

Возбуждение колебаний производится специальным молотком (рис. 3.16) со встроенным датчиком силы. Это позволяет синхронизировать отсчет времени принимаемого сигнала с моментом 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».

Временное и частотное (БПФ) отображение акустического отклика приведено на рис. 3.17...рис. 3.19.



Рис. 3.16 – Типичный комплект Impulse Response системы

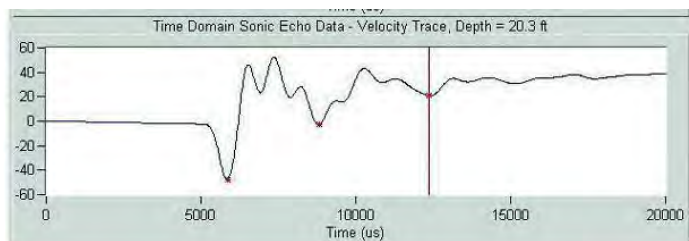


Рис. 3.17 – Временное отображение акустического отклика Impulse Response системы

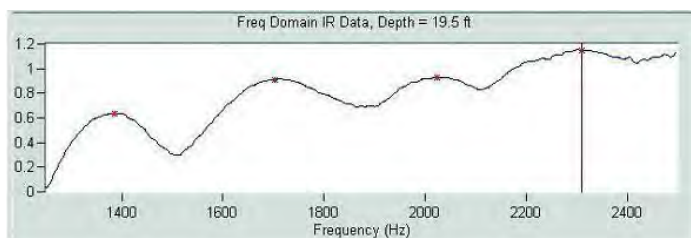


Рис. 3.18 – Частотно-спектральное отображение акустического отклика Impulse Response системы

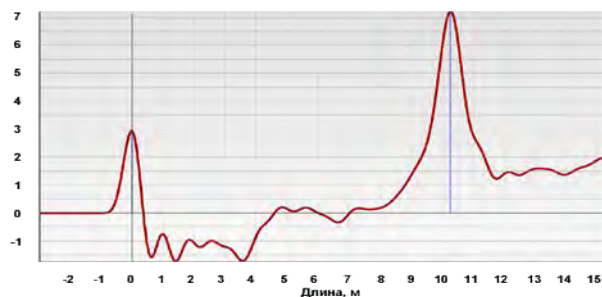


Рис. 3.19 – Типичное временное отображение зондирующего и отраженного импульсов прибора «Спектр-3»

### 3.5 Резонансный многоканальный мультипликативный метод

Импакт-эхо метод обеспечивает приемлемую точность контроля только так называемых протяженных конструкций и элементов – фундаментных блоков, плит, стен, свай, – у которых один размер как минимум в 5 раз меньше, либо в 5 раз больше остальных геометрических размеров. При контроле компактных конструкций, у

которых два или все габариты одного порядка, акустическое поле становится многочастотным. При этом соотношение частотных составляющих и их количество начинает зависеть от соотношения габаритов конструкции, и от координат положения приемного сенсора и точки возбуждения колебаний. Данное обстоятельство значительно затрудняет контроль компактных изделий из бетона, делая его, в ряде случаев, невозможным.

В этой связи, перспективным выглядит резонансный многоканальный мультипликативный метод (РММ) [34, 35]. Указанный метод (см. рис. 3.20) позволяет значительно упростить анализ частотного спектра контролируемой бетонной и железобетонной конструкции, снизив до минимума количество характеристических частот.

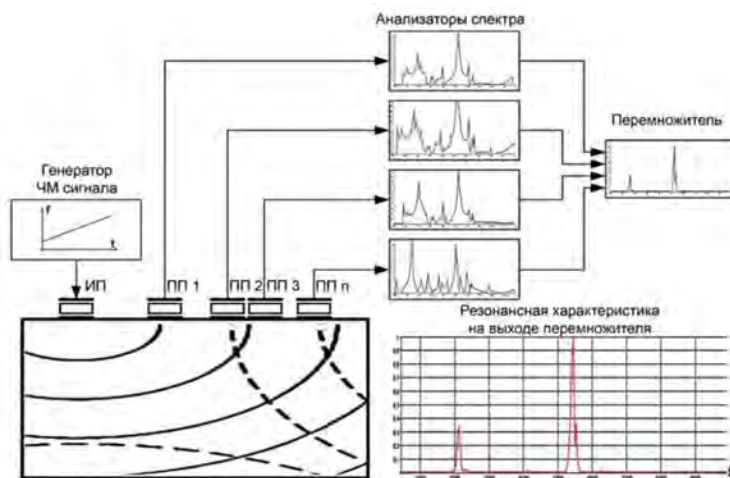


Рис. 3.20 – Схема измерений частотной резонансной характеристики бетонного изделия резонансно-мультипликативным методом [35]

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.

РММ предполагает (рис. 3.20), использование одновременно нескольких приемных преобразователей, либо последовательную установку и регистрацию колебаний одним преобразователем в  $N$  различных точках на поверхности объекта контроля. Резонансные характеристики, полученные в результате многоканального контроля, подвергаются мультипликативной обработке - перемножению. Так как положение пиков, соответствующих частотам основных мод колебаний 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 пиков основных мод колебаний и подавлению прочих резонансных пиков.

На рис. 3.21 показан пример контроля бетонного компактного блока размером 80x50x30 см [35].

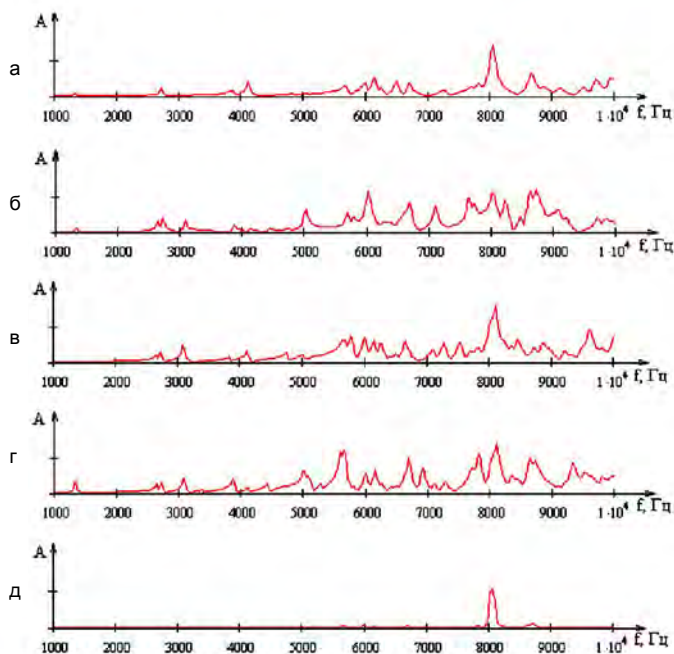


Рис. 3.21 – Частотные спектры бетонного блока 80x50x30 см для четырех позиций установки излучателя и результат обработки по алгоритму РММ [35]



Для 4-х положений приемных преобразователей, расположенных в различных точках поверхности блока зарегистрированы 4 резонансные характеристики. Как видно, однозначная интерпретация спектра в случаях *б* и *г* затруднительна. Вид спектров не позволяет визуально определить характеристические резонансные частоты. На рис. 3.21, д приведен результат перемножения этих характеристик, представляющий собой выраженный резонансный пик, обеспечивающий однозначную интерпретацию оценки толщины контролируемого изделия и скорости акустической волны. Следует отметить, что проблема измерения скорости акустических колебаний в крупногабаритных строительных конструкциях из бетона на сегодняшний день далека от решения. Известные методы определения скорости продольных волн  $V_L$  в бетоне по скорости акустических колебаний на поверхности  $V_s$  не всегда дают точную информацию о реальной скорости  $V$  внутри крупногабаритной конструкции, так физико-механические свойства поверхностного и глубинных слоев бетона часто имеют большие различия. Скорость продольной акустической волны  $V_L$ , рассчитанная через поверхностную скорость  $V_s$ , как правило, на 5..10 % ниже реальной скорости в объеме конструкции из бетона. Это явление, которое объясняется изменением свойств бетона вблизи поверхности вследствие непрерывного контакта с атмосферой, усугубляется также наличием стальной арматуры внутри железобетонных конструкций [84]. Оценка скорости продольных колебаний с помощью ИЕМ получается при условии, что  $\lambda \ll h$ ; в результате

$$V_L = (2hf/k), \quad (3.13)$$

где  $k$  – коэффициент коррекции скорости ( $k < 1$ );  $h$  – толщина изделия в направлении распространения стоячей волны;  $f$  – частота резонанса, соответствующая пику спектральной характеристики отклика.

Для плит, по данным [35],  $\kappa \sim 0,96$ ; для свай  $\kappa = 0,95$ . Таким образом, оценка прочности строительной конструкции с помощью ИЕМ возможно только в тех изделиях, где строго определен коэффициент коррекции скорости  $k$ .

Из представленных материалов можно сделать вывод, что методы собственных частот являются в настоящее время единственно возможными акустическими методами контроля крупногабаритных

строительных конструкций. При этом, ИЕМ позволяет контролировать только протяженные конструкции, у которых определен коэффициент  $k$ . Измерять с помощью ИЕМ толщину крупногабаритных бетонных конструкций, у которых хотя бы два габаритных размера были близки, например колонны прямоугольного сечения, - так называемые компактные конструкции, не представляется возможным из-за влияния геометрических эффектов. Так называемый шум формы изделия, выражающийся в появлении многочисленных резонансных откликов, близких по частоте, не позволяет однозначно определить искомый максимум на спектральной характеристике изделия, а из-за эффекта геометрической дисперсии скорости в компактном изделии невозможно определить скорость акустических колебаний  $V_L$ .

При контроле компактных конструкций частота резонанса первой моды продольной волны зависит не только от толщины, но и от компактности изделия  $m$  – отношения поперечного габарита изделия к продольному. Для исследования этой зависимости были проведены [35] расчеты спектральных характеристик блоков с одинаковой толщиной  $A = 30$  см и с различными значениями  $m$  в диапазоне от 1 до 5. Далее по каждой из этих характеристик были определены частоты  $f$  резонансов первой моды продольной волны и вычислен коэффициент коррекции скорости продольной волны по формуле

$$k = 2fh/V_L . \quad (3.14)$$

Полученная расчетная дисперсионная характеристика параллелепипедов, отражающая зависимость  $k$  от  $m$  показана на рис. 3.22. Также здесь приведен результат аналогичного расчета, выполненного для изделий в форме дисков с диаметрами от 150 до 30 см и толщиной 30 см.

Приведенные данные, в целом, согласуются с формулами классической акустики (см. таб. 3.1). При  $m > 4..5$  длина волны  $\lambda$  будет меньше поперечного размера образца, соответственно, фактическая скорость распространения первой моды резонансных продольных колебаний  $V = 2fh$  будет приближаться к «объемной» скорости продольной волны  $V_L$ .

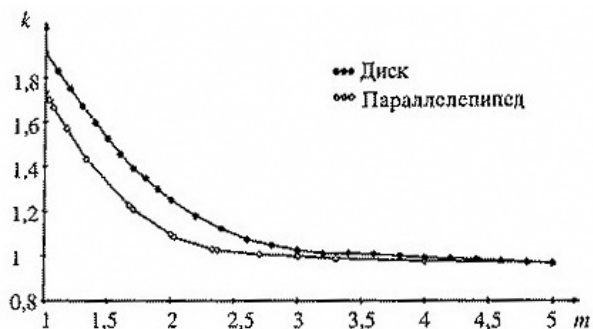


Рис. 3.22 – Дисперсионные характеристики диска и параллелепипеда [35]

При значениях  $m$  близких к единице и менее, фактическая скорость  $V$  будет снижаться, приближаясь к «стержневой»  $c_0$ .  $V$  будет зависеть от коэффициента Пуассона и степени «обжатия» трека распространения колебаний массой поперечного сечения образца. У параллелепипеда эта масса больше, чем у диска, что и отражается меньшим значением  $k$ . Правда, приведенные предельные значения коэффициента  $k = 1,4..1,6$  выглядят несколько завышенными.

Анализ полученных дисперсионных характеристик позволяет сделать ряд существенных выводов, которые следует учитывать при контроле компактных конструкций из бетона [34, 35].

1. Дисперсионные характеристики для изделий наиболее распространенных стандартных форм (диски, параллелепипеды) показывают, что независимо от формы изделия при  $m > 5$  коэффициент коррекции скорости  $k$  стремится к значению 0,96. Это вполне ожидаемый результат, учитывая, что при увеличении  $m$  форма контролируемого изделия становится все более похожей на протяженную плиту, для которой  $k = 0,96$ .

2. Дисперсионные характеристики не зависят от масштаба конструкции, то есть пропорциональное изменение всех ее размеров не влияет на зависимость  $k$  от  $m$ . При увеличении масштаба в  $a$  раз компактность  $m$  остается постоянной, частота резонанса продольной волны уменьшается в  $a$  раз, а толщина  $h$  увеличивается в  $a$  раз. По формуле (3.14), получим

$$k' = \frac{2\left(\frac{f}{a}\right) \cdot h \cdot a}{V_L} = \frac{2fh}{V_L} = k, \quad (3.15)$$

где  $k'$  – коэффициент коррекции скорости продольной акустической волны в изделии в  $a$  раз большего, чем изделие с коэффициентом  $k$ .

Благодаря этому свойству полученные дисперсионные характеристики можно применять для изделий данной формы и любой толщины.

3. Аналогичным образом дисперсионная характеристика не зависит и от скорости продольной волны в конструкции.

4.  $k$  не зависит от затухания акустической волны в бетоне. Изменение  $a$  влечет за собой изменение добротностей резонансных пиков, но не частот резонанса.

Использование дисперсионных характеристик принципиально позволяет определить как толщину, так и скорость акустических колебаний в компактных бетонных конструкциях. Вместе с тем этот метод достаточно трудоемкий и требует объемных предварительных вычислений. Кроме того, существующие методики имеют и другие ограничения. Во-первых, не всегда есть возможность установить датчики в оптимальной зоне на поверхности. Во-вторых, реальные конструкции помимо крупнозернистого наполнителя и арматуры часто содержат более крупные неоднородности: воздушные полости и дефекты. Их присутствие вносит значительные искажения спектральной характеристики.

## ГЛАВА 4

### УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕТОНА

#### *4.1. Ультразвуковой импульсный метод: методическая основа*

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. Нормируется метод в странах СНГ ГОСТ 17624<sup>1</sup> [13], в соответствии с которым в качестве косвенного параметра рассматривается скорость (время) распространения импульса зондирующей волны, имеющая взаимосвязь (см. табл. 3.1) с физико-механическими свойствами бетона. Определение прочности бетона  $f_c$  производят с использованием градуировочной зависимости, связывающей косвенный параметр метода с показателем прочности. То есть, ультразвуковой импульсный метод позволяет определять прочность бетона лишь в той степени, с которой прочность бетона связана с его упругими свойствами (рис. 2.14).

Существенное влияние на скорость распространения упругих волн в бетоне оказывает его многокомпонентный состав, что делает этот материал весьма непростым для контроля. Практика ультразвукового контроля показывает, что корреляция скорости продольной волны и прочности зачастую имеет более устойчивый характер, чем для упругих модулей и прочности [16, 17, 45, 72].

Основным способом контроля по ГОСТ 17624 [13] является сквозное прозвучивание (рис. 4.1). Излучающий и приемный ультразвуковые преобразователи устанавливают с противоположных сторон образца или конструкции, или на смежных гранях, в соответствии с рис. 4.1. Скорость ультразвукового импульса определяется соотношением

---

<sup>1</sup> В Республике Беларусь действует стандарт СТБ EN 12504-4-2014 Методы контроля бетона в конструкциях. Часть 4. Определение скорости распространения ультразвукового импульса

$$v = \frac{L}{t}, \quad (4.1)$$

где  $L$  – расстояние между излучающим и приемным ЭАП;  $t$  – интервал времени между моментами излучения и приема ультразвукового импульса.

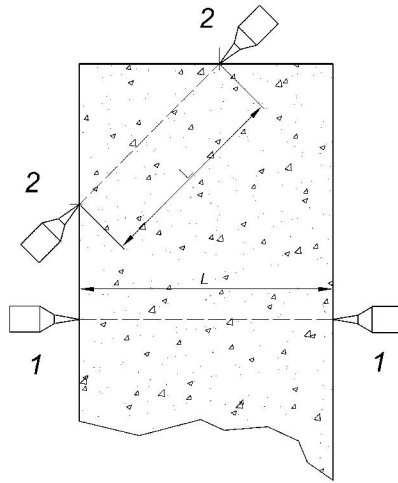


Рис. 4.1 – Схема испытания бетона способом сквозного прозвучивания

Особый интерес для практики контроля монолитного бетона, в том числе и на ранней стадии его твердения, представляет поверхностное прозвучивание (рис. 4.2), что обусловлено ограниченными возможностями доступа к изделию, находящемуся в опалубке, и значительными габаритами монолитных конструкций, затрудняющим соосную установку преобразователей с противоположных граней изделия и определение базы прозвучивания с необходимой точностью.

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 (см. раздел 6.3). В качестве информативного параметра используется *дифференциальная скорость* распространения ультразвукового импульса  $V_d = \Delta L / \Delta t$ .

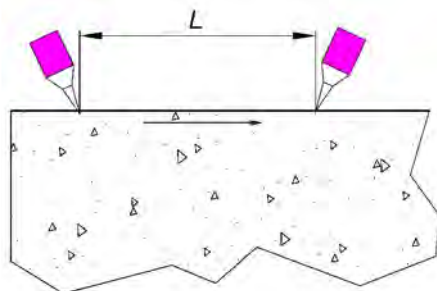


Рис. 4.2 – Схема испытания бетона способом поверхностного прозвучивания:  
 $L$  – база прозвучивания

Поскольку длина волны ультразвуковых колебаний в бетоне лежит в пределах 2...6 см, что соизмеримо с размерами зерен крупного заполнителя, то зона контакта последних с песчано-цементной матрицей бетона оказывает сильное влияние на процесс распространения колебаний, и делает ультразвуковой метод более чувствительным к показателю прочности бетона, чем это следовало бы из известной [70] эмпирической взаимосвязи прочности и модуля упругости

$$E_{cm} = 9,5(f_{ck,cyl} + 8)^{1/3} \cdot 10^3, \text{ МПа}, \quad (4.2)$$

где  $E_{cm}$  - модуль упругости;  $f_{ck,cyl}$  – характеристическая прочность тяжелого и мелкозернистого бетона<sup>2</sup>.

На рис. 4.3 показана упрощенная модель прохождения упругой волны через неоднородную структуру бетона. В пористой структуре 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. 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-

<sup>2</sup> Известны другие варианты записи этой взаимосвязи, в частности, в EN 1992-1 приведена следующая формула  $E_{cm} = 22000(f_{cm}/10)^{0,3}$ , МПа.

цементной матрицы. В терминах акустики это выражается в несогласованности их акустических импедансов и, как следствие, - к дополнительному затуханию из-за отражений на границах. В более плотном бетоне, с бóльшим количеством кристаллизационных связей, траектории передачи энергии акустического импульса изломаны в меньшей степени, плотность и модуль упругости песчано-цементной матрицы выше.

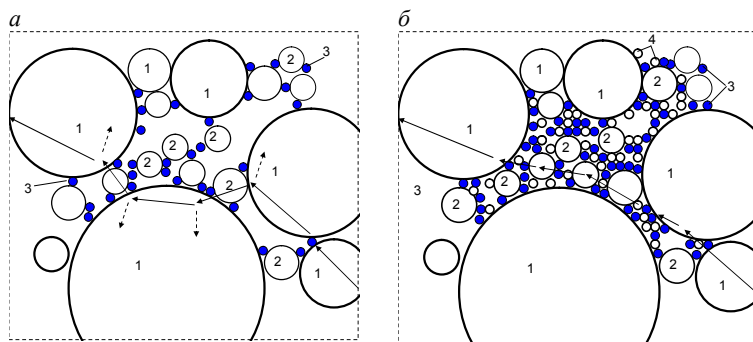


Рис. 4.3 – Упрощенная модель структуры бетона:  
*a* – бетон низкой прочности; *б* – бетон высокой прочности;  
 1 – зерна крупного заполнителя; 2 – зерна мелкого заполнителя;  
 3 – кристаллы цементного камня; 4 – зерна микрокремнезема

Это проявляет себя в меньшем затухании акустического импульса, большей скорости его распространения и меньшей частотной дисперсии скорости.

В работах [3,6] отмечается, что при одинаковой прочности модуль упругости бетона меняется в широких пределах. Поскольку фракционный состав, вид и количество крупного и мелкого заполнителей влияют на прочность бетона и модуль упругости по-разному, то нельзя рассчитывать модуль упругости, не учитывая состава и свойств заполнителей. В работе [7] отмечается: «При измерении упругих деформаций бетонов разной прочности фиксируется в ряде случаев не возрастание, а падение модуля (упругости) с ростом прочности бетона. Противоречия и расхождения в оценках модуля упругости бетона следует отнести, несомненно, за счет того, что существующие эмпирические зависимости не отражают влия-



ния на его величину всех важнейших факторов». В этой же работе О.Я. Берга выполнен анализ данных корреляции модуля упругости и предела прочности для бетонов, объединенных в группы по различным показателям: количеству разновидностей цемента, заполнителя, содержания цементного теста, условий уплотнения и твердения, возраста (от 1...360 суток до нескольких лет). Приведенные данные показывают, что в пределах каждой из групп испытаний между модулем упругости и пределом прочности бетона наблюдалась надежная корреляционная связь. Коэффициент корреляции, за редким исключением, был весьма высоким ( $r = 0,95...0,99$ ). Указанный уровень корреляции обнаруживался равным образом и для низких, и для высоких значений прочности».

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.

На рис. 4.4 и 4.5 приведены графики градуировочных зависимостей для бетонов разных составов и разных сроков твердения. Без учета возраста твердения бетона различие в оценках его прочности стандартным ультразвуковым методом может достигать 30...40 %. В таблице 4.1 приведены градуировочные зависимости в виде степенных функций, построенные по стандартной методике лабораторных испытаний образцов-кубов для бетонов указанных составов.

Остаточное среднее квадратическое отклонение  $S_T$  для приведенных зависимостей находилось в пределах 2...3,6 МПа. Такое же значение  $S_T$  обеспечивалось экспоненциальными зависимостями вида

$$f_{c,us} = A \cdot e^{B \cdot t}$$

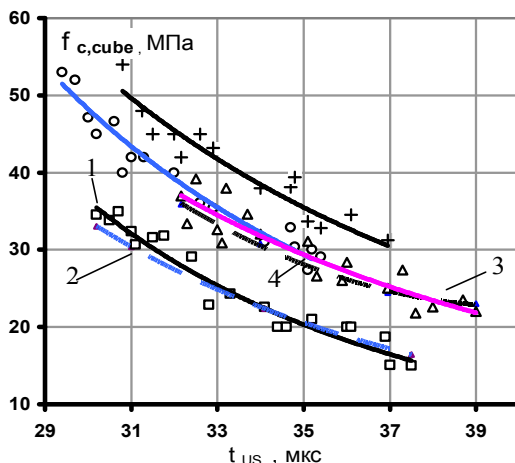


Рис. 4.4 – Данные испытаний бетонных образцов составов № 1 и 2 (см. прил. таб. А.1) и соответствующие градуировочные зависимости  
 + - состав № 1, возраст бетона 14 сут; ○ – состав № 2, возраст бетона 14 сут; Δ, □ – соответственно составы №№ 1 и 2, возраст бетона 2 сут

Таблица 4.1 – Градуировочные зависимости для оценки прочности бетона в возрасте 14 суток

№ состава бетона (таблица Б1)	Градуировочная зависимость
1	$f_{c,us}^1 = 2,74 \cdot 10^6 \cdot t^{-3,219}$ ; (4.3)
2	$f_{c,us}^2 = 6,5 \cdot 10^5 \cdot t^{-2,784}$ ; (4.4)
3	$f_{c,us}^3 = 2,01 \cdot 10^9 \cdot t^{-5,009}$ ; (4.5)
4	$f_{c,us}^4 = 1,17 \cdot 10^6 \cdot t^{-2,909}$ ; (4.6)

$t$ , мкс – время распространения продольной подповерхностной волны на базе 150 мм.;  $f_{c,us}$  – оценка прочности бетона на сжатие, МПа

Необходимость «привязки» ультразвукового метода испытаний к составу бетона и технологии производства бетонных работ можно рассматривать как его главный недостаток. Можно предположить, что именно указанные соображения вызвали недоверие разработчи-

ков СТБ 2264-2012 к ультразвуковому методу испытаний бетона, что выразилось в ограничении его использования<sup>3</sup>.

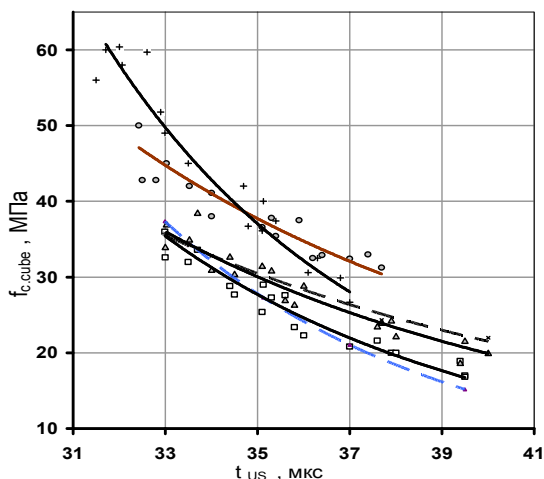


Рис. 4.5 – Данные испытаний бетонных образцов составов № 3 и 4 (см. прил. табл. А.1) и соответствующие градуировочные зависимости + - состав № 3, возраст бетона 14 сут; ○ – состав № 4, возраст бетона 14 сут; Δ, □ – соответственно составы № 3 и 4, возраст бетона 2 сут

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 в качестве эффективного экспресс-метода для выявления участков железобетонной конструкции, вызывающих сомнения в качестве бетона. Уточненная оценка прочности бетона может быть выполнена с дополнительным привлечением механических методов испытаний.

<sup>3</sup> Пункт 6.18 [33] - 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.

#### 4.2. Прогнозирование прочности бетона в проектном возрасте по данным измерения скорости ультразвука

Прямая зависимость скорости распространения акустического импульса от динамических упругих модулей бетона позволяет использовать УЗИ метод для контроля кинетики набора прочности бетоном в ранней стадии его твердения, в сроках 0,5..2 суток.

В работе [28] указывается на существование корреляции между прочностью цементного камня в возрасте 28 суток и характерным временем нарастания скорости ультразвука, определенным в первые сутки нормального твердения. Прочность затвердевшего бетона будет тем больше, чем плотнее и компактнее начальная структура бетона и чем интенсивнее процессы начального структурообразования. Авторами [28] предлагается в качестве прогнозного параметра бетона использовать приращение скорости продольной упругой волны в начальный период структурообразования.

Для проверки применимости указанного прогнозного параметра для приведенных в табл. А1 составов бетона были использованы данные кинетики твердения бетонных образцов (рис. 4.6). Первое измерения скорости УЗ импульса в образцах производилось в возрасте 12 часов, второе – в суточном возрасте. Температура образцов – 17...20°C. Одна из кинетических диаграмм приведена на рисунке 2.14. Испытывались по 5 образцов каждого состава. Средние приращения скорости ультразвука за 12 часов составили: для состава № 1 – 1627 м/с, для состава № 2 – 1561 м/с, для состава № 3 – 1709 м/с. В пересчете на одну минуту средние приращения скорости составили: для состава № 1 – 2,260 м/(с·мин), № 2 – 2,168 м/(с·мин), № 3 – 2,374 м/(с·мин).

В табл. 4.2 приведены прогнозные и средние значения фактической прочности образцов в возрасте 28 суток. Прогнозное значение прочности бетонов  $f_{c, cube}^*$  рассчитывалось по эмпирической зависимости

$$f_{c, cube}^* = 20,1 \cdot dC/dt, \text{ МПа.} \quad (4.7)$$

Как видно по табл. 4.2, максимальная погрешность прогноза составила 11,9 % для состава № 2.

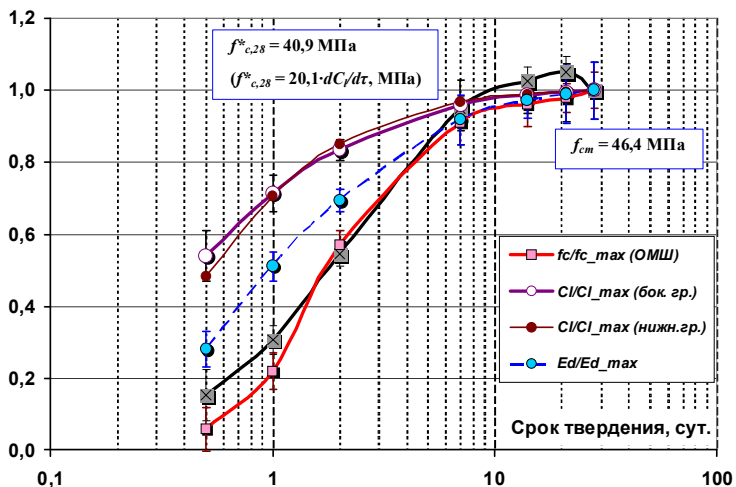


Рис. 4.6 – Прогнозирование прочности бетона проектного возраста на основе параметров кинетики твердения УЗ методом (класс бетона – С35/45)

Таблица 4.2 – Прогнозная и фактическая прочность бетона образцов

№ составов	1(С25/30)	2(С35/45)	1(С30/37)
$dC/dt$ , $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{мин}^{-1}$	2,26	2,17	2,37
$f_{c, cube}^*$ , МПа	45,4	40,9	47,7
$f_{c, cube}$ , МПа	43,8	46,4	53,5
$\delta f_{c, cube}$ , %	3,7	11,9	10,8

Примечательным является то, что указанный состав не обеспечил достижения проектной прочности, на что указывали данные прогнозной оценки в возрасте бетона 12 часов.

#### 4.3. 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 по-

верхностью 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  $\lambda$  не должна быть меньше размеров зерен крупного заполнителя. Для среднего размера зерна щебеночного заполнителя 1,5..2 см, типовой 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 от крутизны фронта сигнала. 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  $\delta$  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  $\sim 0,5 \text{ мкс}$ , а максимальная длительность фронта сигнала  $\tau_{\phi} = 0,5 \cdot \text{с}/\text{ш} = 5 \text{ мкс}$ . Длительность фронта приблизительно

равна четверти периода колебаний. Таким образом, нижняя граница частоты зондирующих колебаний составит

$$f_{US,min} = \frac{1}{T_{US}} = \frac{1}{20 \cdot 10^{-3}} = 50 \cdot 10^3, \text{ Гц}$$

*а*

*б*



*в*



Рис. 4.7 – Ультразвуковые приборы контроля бетона:  
*а, б* – приборы серии «Пульсар», *в* – УК1401

Обычное значение рабочей частоты для большинства приборов ультразвукового контроля бетона лежит в пределах от 50 кГц до 200 кГц. Самое распространенное значение – приборы УК1401 и приборы серии «Пульсар» (рис. 4.7) – 54...60 кГц.

#### 4.4 Конструктивные схемы ЭАП

В современных приборах для ультразвуковых испытаний бетона используются ЭАП с активным элементом из пьезокерамики. 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.

Следует заметить, что формирование зондирующего акустического импульса производится «ударным» возбуждением активного элемента электроакустического преобразователя (ЭАП). К пьезоэлементам подводится перепад (скачок) электрического напряжения порядка 400...800 Вольт, что приводит к возникновению в них внутреннего механического напряжения. Скачкообразное механическое напряжение пьезоэлемента приводит к его деформации, которая распространяясь и отражаясь от торцов пьезоэлемента, создает в нем затухающие волны. Основная частота волн соответствует полуволновой толщине  $T_{пз}$  пьезоэлемента, и может быть рассчитана по формуле (3.2)<sup>4</sup>. Таким образом, частота формируемых ЭАП ультразвуковых колебаний определяется размерами активного элемента и его физико-механическими характеристиками и практически не зависит от параметров возбуждающего сигнала.

В настоящее время можно выделить три конструктивные схемы ЭАП:

- схема I, с использованием «толстого» пьезоэлемента, которая может дополняться акустическим концентратором с точечной протекторной зоной;
- схема II, с использованием «сэндвича» их двух тонких пьезоэлементов, возбуждаемых в режиме либо изгибных, либо продольных колебаний;

---

<sup>4</sup> При 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 внимание, используя ЭАП с вязким акустическим контактом.



- схема III, с векторным сложением колебаний двух пьезоэлементов;

Схему I можно назвать классической. ЭАП по схеме I (рис. 4.8) обычно представляет собой сборную конструкцию, состоящую из типового низкочастотного ЭАП с плоской протекторной зоной, к которой, через слой контактной смазки прижимается торцевая часть концентратора. В качестве активного элемента такого типа ЭАП используется пакет пьезокерамических дисков поляризованных по толщине. Акустически диски акустически включены последовательно – толщина пакета выбирается равной  $\lambda_0/2$ , электрически – параллельно. Концентратор “фокусирует” акустическое давление, распределенное по рабочей плоскости преобразователя в точечную зону контакта. Если осевая линия концентратора совпадает с осью пьезоэлемента (рис. 4.9, б), то в протекторе будет распространяться волна сжатия-растяжения, а его рабочий конец будет совершать колебания в осевом направлении. При осевом эксцентриситете в концентраторе дополнительно возникают изгибные и сдвиговые деформации, которые также можно использовать для возбуждения колебаний в контролируемой среде.

Механизм «концентрации» колебаний обусловлен законом сохранения импульса

$$M_\lambda \cdot v = m_\lambda \cdot V, \quad (4.8)$$

где  $M_\lambda$  – масса приведенного к длине волны участка концентратора связанного с пьезоэлементом;  $m_\lambda$  – масса приведенного к длине волны рабочего участка концентратора;  $v$  и  $V$  – соответствующие колебательные скорости.

Направленность излучаемого акустического импульса  $\alpha$  зависит от отношения длины волны колебаний  $\lambda$  к диаметру контактной зоны  $D$  (см. рис. 4.9,а)

$$\alpha \approx 2 \arcsin\left(1.22 \frac{\lambda}{D}\right), \text{ радиан} \quad (4.9)$$

Для точечного контакта диаграмма направленности вырождается в сферу. При изменении ориентации оси концентратора ЭАП по отношению к плоскости поверхности контроля (рис. 4.9,б) диа-

грамма также поворачивается (рис. 5.4, 5.7, 5.13), изменяя направленность и поляризацию излучаемых колебаний (рис. 4.10).

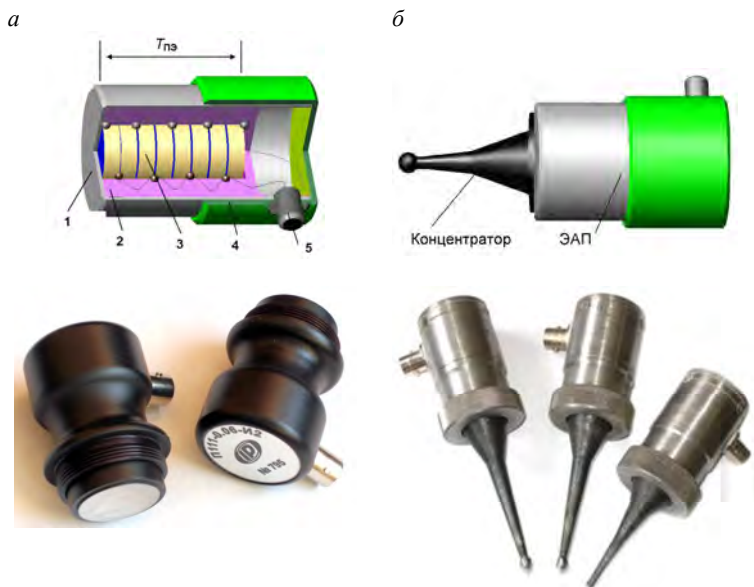


Рис. 4.8 – Электроакустические преобразователи:

*а* – 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

При поверхностном контроле бетона обычно используется продольная подповерхностная волна. Для ее создания (и приема) ЭАП устанавливаются наклонно к поверхности (рис. 4.7, а, б, рис. 4.9, б). В этом случае подповерхностная продольная волна инициируется горизонтальной составляющей вектора  $c_l$  (рис. 4.10).

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. Образующаяся объемная поперечная волна имеют максимум интенсивности в направлении  $35...75^\circ$  от нормали к поверхности. Поперечная волна может быть зафиксирована при поверхностном контроле, - так называемая *SH*

волна (рис. 5.1). Интенсивность указанных волн также зависит от ориентации оси ЭАП.

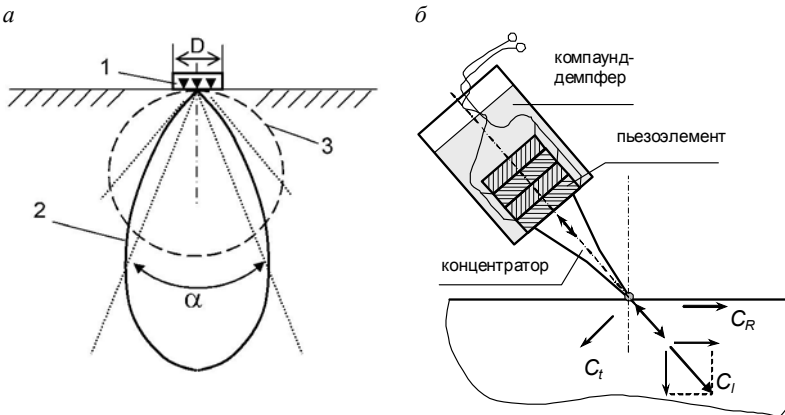


Рис. 4.9 – Направленность излучения-приема ультразвука:  
*а* - диаграммы направленности излучателей УЗК; *б* – поляризация УЗК  
 ЭАП с акустическим концентратором

*1* – излучатель диаметром  $D$ ; *2* - диаграмма направленности:  
 ( $\alpha$  - раскрыв диаграммы направленности излучателя (приемника), рад;  
 $D$  – диаметр излучающей зоны,  $\lambda$  – длина волны);  
*3* - диаграмма направленности точечного излучателя

Селекции различных типов волн, распространяющихся вдоль поверхности бетона, ЭАП такого типа может способствовать изменение ориентации их осей при их рабочей установке (рис. 4.10). В позиции 2, сигнал приемного ЭАП определяется двумя процессами: продольной подповерхностной волной, распространяющейся со скоростью  $c_l$  и волной Релея, скорость которой  $c_R$ . Селекция может производиться по времени появления сигнала и его амплитуде.

Фронт первого вступления сигнала определяется продольной волной, скачок амплитуды будет обусловлен появлением волны Релея. Позиция 3 позволяет частично «отстроиться» от продольной волны, сохранив чувствительность ЭАП к нормальным к поверхности колебаниям, вызванными волной Релея. Позиция 4 позволяет принимать поверхностную поперечную волну типа  $SH$ , но селекция её затруднена присутствием волны Релея, имеющей скорость распространения близкую к скорости поперечной волны.

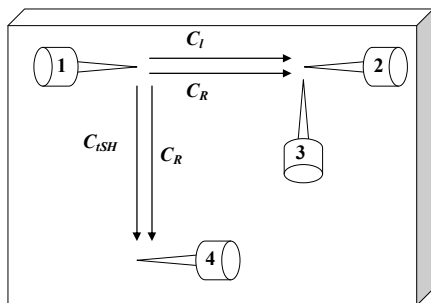


Рис. 4.10 – Схема расположения ЭАП с акустическими концентраторами для селективного приема поверхностных волн (вид в плане):  
 1 – излучающий ЭАП; 2, 3, 4 – позиции приемного ЭАП

Достоинством ЭАП схемы I является возможность генерации акустических импульсов большой амплитуды, за счет большого объема вовлеченной в колебательный процесс пьезокерамики. Недостатки: большие габариты, невозможность «электронного» управления вектором колебаний, неравномерная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), имеющая несколько выраженных резонансных частот. Резонансные частоты обусловлены существованием нескольких типов колебаний: активный пьезоэлемент может совершать колебания по своей толщине  $T_{пз}$  и радиальные колебания по своему радиусу. Свои резонансные частоты имеет и концентратор, и корпус ЭАП. Поэтому акустический отклик ЭАП на импульс возбуждения является квазигармоническим, состоящим из накладывающихся фрагментов синусоид (рис. 4.11). Наличие нескольких резонансных частот можно рассматривать как недостаток ЭАП.

При «ударном» импульсном возбуждении ЭАП затраченная энергия электрического импульса распределяется по всем частотам механического резонанса. С течением времени происходит ее перераспределение (многократное) между частотными компонентами, что проявляется в изменении амплитуды возбуждаемых колебаний. При этом максимальную амплитуду колебания имеют, как правило, не в первый период, а в последующие (рис. 4.11). Это обстоятельство может создавать затруднения при регистрации начала принимаемого акустического сигнала, а также, - для временной селекции сигналов разных типов волн, так как начало сигнала поперечной

волны или волны Релея может накладываться на «хвост» сигнала продольной волны. Одним из используемых способов уменьшения резонансности ЭАП является заполнение его корпуса компаундом с большим затуханием акустических волн. Но для ЭАП типа I этот способ малоэффективен.

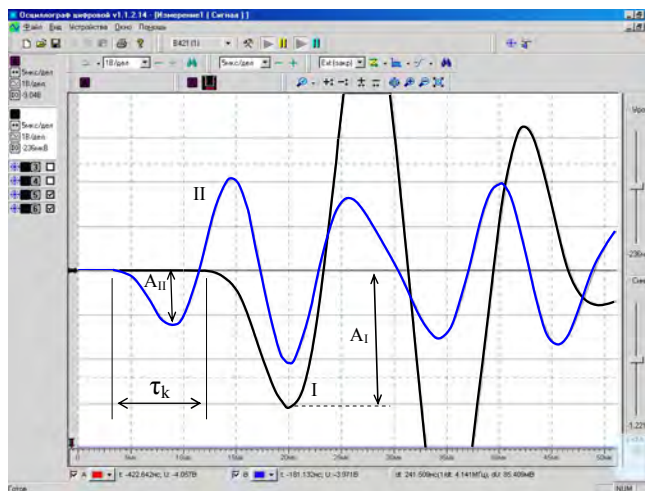


Рис. 4.11 – Осциллограммы сигналов акустического зонда при измерениях параметров УЗ излучателей: I – ЭАП с акустическим концентратором (основная частота – 57 кГц); II – ЭАП конструкции рис. 4.12;  $A_I$  и  $A_{II}$  – амплитуды первого вступления импульсов;  $\tau_k$  – время задержки акустического импульса в концентраторе

Активный элемент ЭАП схемы II (рис. 4.12) представляет собой двухслойный пьезоэлемент, слои которого возбуждается в противофазе.

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 по схеме II создает тангенциальные колебания точки контакта с бетоном и эффективен для создания поперечных волн и продольных подповерхностных. Такого типа ЭАП используется в ряде приборов, в частности, - УК1401 и низкочастотных дефектоскопах А1201 и А1040 [39, 100].

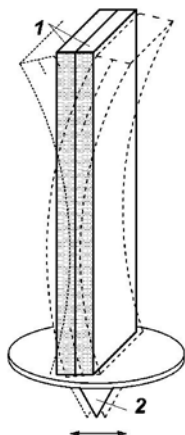
*a**б*

Рис. 4.12 – ЭАП по схеме II: *a* – конструктивная схема; *б* – образцы ЭАП

Изгибные колебания пьезоэлемента эффективно демпфируются компаундом, что дает возможность генерации коротких по длительности зондирующих импульсов необходимых для ультразвуковой дефектоскопии бетона.

В основу принципа работы ЭАП по схеме III (рис. 4.13) положено векторное сложение колебаний двух пьезопреобразователей возбуждаемых в разных фазах [86].

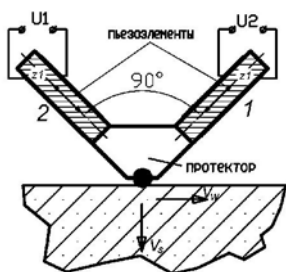
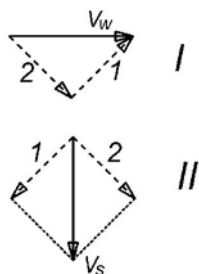
*a**б*

Рис. 4.13 – ЭАП с суммированием векторов колебаний пьезоэлементов: *a* – конструктивная схема; *б* – схема суммирования векторов колебаний; I – для противофазного возбуждения; II – для синфазного возбуждения

Пьезоэлементы с характеристическим импедансом  $z_l$  установлены на призму протектора под углом  $90^\circ$ . В области контакта ЭАП с контролируемой средой происходит сложение колебаний; в силу осевой симметрии схемы имеет место геометрическое сложение векторов колебаний. В зависимости от режима возбуждения пьезоэлементов может иметь место три режима работы ЭАП на основной частоте  $f_0$ .

- режим синфазного возбуждения активных элементов;
- режим противофазного возбуждения;
- режим ортогонального возбуждения.

В первом случае нормальные составляющие векторов суммируются, а тангенциальные – взаимно компенсируются. Зона контакта протектора совершает нормальные к поверхности колебания - вектор  $V_s$ .

В режиме противофазного возбуждения суммируются тангенциальные составляющие, а нормальные – компенсируются. Контактная зона протектора совершает касательные к поверхности колебания -  $V_w$

В режиме ортогонального возбуждения, напряжения возбуждения пьезоэлементов сдвинуты на четверть периода. Протекторная зона ЭАП колеблется по круговой (эллиптической) траектории в плоскости осей пьезоэлементов. Указанный режим может быть использован для преимущественного формирования волн Релея, например, с целью оценки упругих модулей бетона.

Приведенная схема ЭАП (рис. 4.13) позволяет, за счет смены режимов электрического возбуждения, формировать в контролируемой среде различные типы акустических волн, осуществлять их селективный прием, повышая тем самым информативность контроля.

Конструктивным недостатком ЭАП по схеме рисунка 4.13 является низкая технологичность изготовления и значительные размеры. В качестве альтернативного варианта может рассматриваться конструкция ЭАП с параллельным расположением пьезоэлементов (рис. 4.14, 4.15).

Длина активного элемента  $L$  выбирается из соотношения  $L = \lambda/2$ . Чувствительность ЭАП (по первому вступлению сигнала), как показали испытания, снизилась при этом на 20...25%, но удалось заметно уменьшить реверберацию при использовании демпфирующего

компаунда, вероятно – за счет акустической связи боковых граней пьезопластин через компаунд.

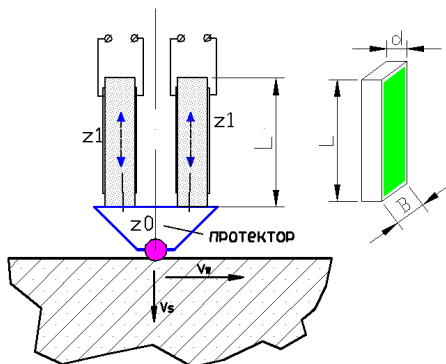


Рис. 4.14 – ЭАП с параллельной установкой пьезоэлементов



Рис. 4.15 – Активные элементы ЭАП с суммирующим протектором

Испытывались варианты конструкций ЭАП для частот в пределах 30...100 КГц. Важным параметром оказалась толщина элемента  $B$ .

#### 4.5 Ультразвуковой импульсный метод: метрологический аспект

Для определения акустических свойств бетона в конструкциях импульсный метод измерения скорости распространения пока является наиболее распространенным в практике испытаний [27, 38, 45].



В то же время точное определение скорости акустической волны по времени распространения зондирующего импульса является весьма нетривиальной задачей из-за эволюции амплитудных и фазовых соотношений между частотными составляющими импульса распространяющегося в материале с выраженной структурной неоднородностью. Для стандартизированных методик определения прочности бетона по скорости распространения ультразвукового импульса на малой базе прозвучивания указанные факторы не имеют принципиального значения, поскольку их влияние «автоматически» учитывается при построении градуировочной зависимости. При разработке же перспективных методик оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) бетона конструкций по параметрам его акустической анизотропии (см. раздел 4.7), минимизация приборной погрешности измерения скорости (времени) распространения акустического импульса на базах измерения более 1 м, где факторы частотной дисперсии скорости и затухания импульса вносят значительную составляющую погрешности, становится первостепенной задачей.

В идеальном случае, формируемый излучающим ЭАП акустический импульс представляет собой 1...2 периода колебаний близких по форме к гармоническим. Максимум спектральной плотности такого сигнала будет определяться периодом колебаний, но ширина частотного спектра  $\Delta\omega$  будет зависеть от длительности  $\tau_0$  сигнала

$$\Delta\omega = \frac{1}{\tau_0}, \quad (4.10)$$

достигая для коротких импульсов 100..150% от средней частоты. Таким образом, зондирующий ультразвуковой импульс представляет собой множество частотных составляющих, отличающихся амплитудами и частотами. Структурная неоднородность бетона, как уже отмечалось выше, придает ему по отношению к акустическим сигналам фильтрующие свойства. Сигналы высоких частот испытывают большее затухание, чем низких. Одновременно с этим, неоднородность структуры бетона создает механизм частотной дисперсии скорости ультразвукового сигнала, - зависимости скорости распространения акустических колебаний от их частоты. Оба указанных фактора проявляют себя тем, что по мере распространения

акустического импульса происходит некоторое изменение его формы: он становится более «гармоническим», с большим числом колебаний, увеличивается его длительность, частотный спектр сужается. Отличие временной формы принятого импульса от излученного затрудняет их сопоставление и выявление общих идентифицирующих фрагментов, между которыми можно было бы измерить временной промежуток и рассматривать его как время распространения импульса.

Описать этот процесс можно используя аппарат передаточных функции, рассматривая среду распространения ультразвукового сигнала в бетоне как четырехполюсник, преобразующий зондирующий импульс в принятый выходной сигнал. Вид передаточной функции будет разным для различных составов бетона, условий укладки и твердения.

В монографии [64] предложена методика анализа акустического сигнала, испытавшего частотную дисперсию скорости распространения. Параметры частотной дисперсии контролируемой среды предложено рассматривать в качестве параметров передаточной функции, записанной в виде

$$K(\omega) = \exp[iq(\omega)L], \quad (4.11)$$

где  $q(\omega)$  – постоянная распространения,

$$q(\omega) = q^*(\omega) + iq^{**}(\omega), \quad (4.12)$$

имеющая действительную часть  $q^*(\omega)$ , связанную с пространственной дисперсией, и мнимую  $-iq^{**}(\omega)$ , обусловленную частотнозависимым затуханием акустического сигнала,  $L$  – база измерения:

Если на вход фильтра с передаточной функцией  $K(\omega)$  подать сигнал со спектром  $S(\omega)$ , то на выходе получим сигнал со спектром  $S(\omega) \cdot \exp[iq(\omega)L]$ . Обратное преобразование Фурье позволит найти временное представление сигнала после прохождения контролируемой среды:

$$U(L, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \cdot \exp[iq(\omega)L] \cdot \exp(-i\omega t) d\omega. \quad (4.13)$$

Рассмотрим зондирующий импульс  $U(0,t)$  с колоколообразной огибающей единичной амплитуды (рис. 4.16,а)

$$U(0,t) = \exp(-t^2 / 2\tau_0^2) \cdot \exp(-i\omega_0 t), \quad (4.14)$$

где  $\omega_0$  – основная частота колебаний в импульсе;  $2\tau_0$  – эффективная длительность импульса.

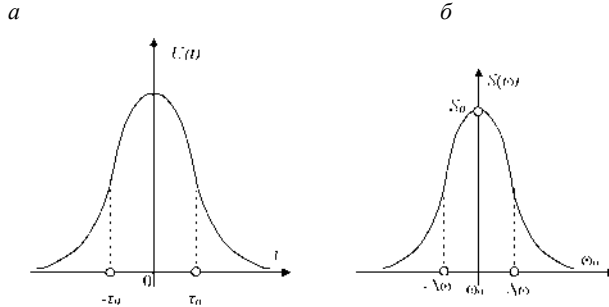


Рис. 4.16 – Временное (а) и частотное (б) отображения акустического импульса

Спектр  $S(\omega)$  такого импульса (рис. 4.16,б) имеет также колоколообразную форму

$$S(\omega) = \sqrt{2\pi}\tau_0 \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}(\omega - \omega_0)^2 \tau_0^2\right], \quad (4.15)$$

При ударном возбуждении временная форма импульса отличается от описываемой формулой (4.14), но чем больше база распространения, тем ближе его огибающая приближается к гауссовой кривой.

В работе [64] рассмотрен случай распространения акустического импульса в среде, когда имеет место частотная зависимость скорости, а затухание в полосе частот импульса остается постоянным ( $q^{**}(\omega) = \text{const} = \alpha_0$ ). Приведенные в [64] выкладки показывают, что параметр имеющий размерность скорости в такой среде не может рассматриваться в отрыве от комплекса величин, характеризующих его частотные дисперсию и затухание, которые сами, в свою очередь, зависят от структурных изменений среды. Для импульса колоколообразной формы (4.14), прошедшего дистанцию  $L$  в среде с по-

стоянной распространения  $q'(\omega)$ , обратное преобразование Фурье дает выражение:

$$U(L, t) = \frac{\tau_0}{\tau_n} \exp \left[ -\frac{(t - t_{gr})^2}{2\tau_n^2} \right] \cdot \exp(-\alpha_0 L) \times \quad (4.16)$$

$$\times \exp \left\{ -i \left[ \omega_0 t - \frac{\omega_0 L}{V_\varphi(\omega_0)} + \frac{LD_S}{2\tau_0^2 \tau_n^2} (t - t_{gr})^2 - \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{LD_S}{\tau_0^2} \right] \right\}$$

где  $\tau_n$  – длительность импульса из-за дисперсии скорости,

$$\tau_n = \tau_0 \sqrt{1 + \frac{L^2 D_S^2}{\tau_0^4}}. \quad (4.17)$$

Формулу (4.16) можно записать в виде

$$U(L, t) = R(L, t) \cdot \exp[-i\varphi(L, t)], \quad (4.18)$$

где функции  $R(L, t)$  и  $\varphi(L, t)$  характеризуют амплитудные и фазовые изменения акустического импульса. Выражение для фазы в формуле (4.16) показывает, что с фазовой скоростью основной частоты движутся только две точки, определяемые уравнением [64]

$$(t - t_0)^2 = r_0^4 \frac{1}{L \cdot D_S} \left( 1 + r_0^{-4} L^2 D_S^2 \right) \cdot \operatorname{arctg} \left( r_0^{-2} LD_S \right), \quad (4.19)$$

где  $2r_0$  – эффективная длительность волнового пакета.

При малой величине параметра  $r_0^{-2} LD_S$  для  $t$  получим

$$t \approx t_0 \pm r_0, \quad (4.20)$$

что соответствует моментам времени, в которых производная функции возбуждающего импульса  $U(0, t)$  по времени достигает максимальных значений.

Данное обстоятельство указывает на метрологически более обоснованный способ регистрации времени (скорости) распространения ультразвукового импульса, чем используемый в большинстве приборов ультразвукового контроля бетона способ «по фронту первого вступления». Формулы (4.16) и (4.17) показывают, что колоколообразная форма импульса проходящего через дисперсную среду

сохраняется, меняется лишь соотношение между его амплитудой и длительностью, которое, для принятых выше допущений, является масштабным фактором.

#### *4.6 Экспериментальное сопоставление способов регистрации времени распространения ультразвукового импульса*

Регистрация принятого акустического импульса по фронту первого вступления использовалась в устаревших автоматических измерителях скорости/времени ультразвукового импульса: УК-12, УК-14, УК-16 и аналогичных. Такая же методика приводится в руководстве к некоторым современным приборам, в частности, приборам серии «Пульсар». Основным, уже упомянутым недостатком, является подверженность результата измерения эффекту частотной дисперсии скорости, а также сильное влияние качества акустического контакта, что отчетливо проявляется для ЭАП с СТК. По этой причине ГОСТ 17624 [13] рекомендует проводить измерения скорости ультразвукового импульса в бетоне, используя такую базу прозвучивания, на которой проводились градуировочные испытания. Главным достоинством такой методики измерения является простота технической реализации. Кроме того, регистрация принятого импульса по фронту его первого вступления позволяет измерять скорость УЗ импульса в малоразмерных бетонных образцах, не опасаясь интерференции акустического сигнала с его переотражениями от граней образца.

Регистрацию времени по фронту импульса можно осуществлять для каждого принятого импульса, а можно – для последовательности импульсов, усреднив их значения. Разница этих алгоритмов принципиальная. На рис. 4.17 показана временная диаграмма принятого акустического импульса, прошедшего через среду с сильным затуханием. На полезный сигнал частотой  $\sim 50$  кГц накладывается помеха, обусловленная тепловыми шумами усилительного тракта прибора. Визуально момент времени соответствующий появлению фронта первого вступления сигнала можно ориентировочно определить как 115...117 мкс, принимая в рассмотрение первый отрицательный выброс. Причем указанное значение будет регистрироваться со значительной неопределенностью, порядка единиц микросекунд, из-за влияния теплового шума.

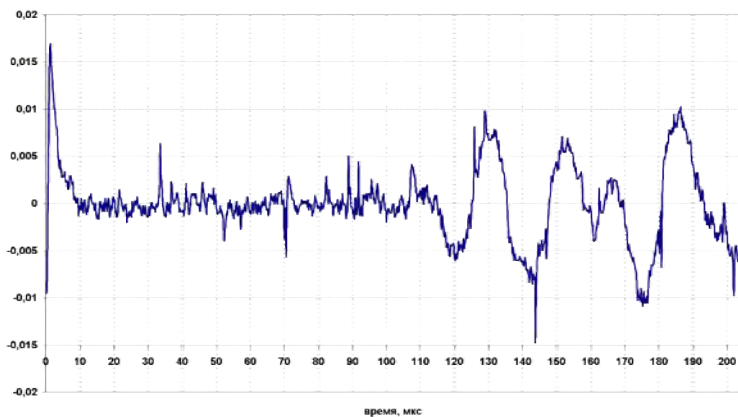


Рис. 4.17 – Временная диаграмма одиночного акустического сигнала в среде с сильным затуханием

На рис. 4.18 приведен результат суммирования последовательности 16 сигналов, прошедших через среду с сильным затуханием<sup>5</sup>.

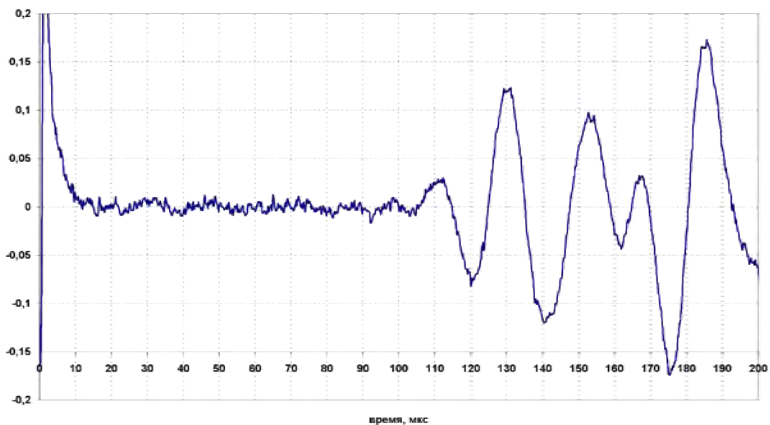


Рис. 4.18 – Временная диаграмма суммы последовательности 16 акустических сигналов в среде с сильным затуханием

<sup>5</sup> Измерения проводились с использованием измерительного тракта прибора «Пульсар -1.1» и цифрового осциллографа В-421. Частота дискретизации сигнала – 5 МГц.

Первое, что можно заметить, - сигнал стал заметно «чище», относительный уровень шума уменьшился. Улучшение соотношения сигнал/шум можно ориентировочно определить по формуле

$$(c/u)^* = \sqrt{n}, \quad (4.21)$$

где  $n$  – количество суммируемых сигналов.

Для  $n = 16$ , соотношение сигнал/шум увеличилось в 4 раза, что позволяет «разглядеть» первый положительный выброс, фронт которого начинается в момент времени  $\sim 105$  мкс, что на 10 мкс меньше результата для одиночного импульса (рис. 4.17). Таким образом, алгоритм накопления сигнала позволяет повысить точность измерения и чувствительность приемного тракта прибора. Реализация алгоритма накопления сравнительно просто может быть осуществлена на основе цифровых методов обработки информации, с использованием встроенных в прибор программируемых микроконтроллеров.

Несмотря на возможность качественного улучшения приема ультразвукового сигнала с применением алгоритма накопления, определение момента начала полезного сигнала ориентировано на само это начало, которое, как можно видеть на приведенных выше диаграммах, значительно меньше по амплитуде, чем следующие за ним колебания. Это значит, что алгоритм регистрации фронта первого вступления сигнала принимает в расчет только начальный фрагмент сигнала, игнорируя его основную часть, содержащую большую часть энергии (и информации) сигнала. Кроме того, такое решение затрудняет ответ на вопрос о частоте зондирующего сигнала, поскольку та часть сигнала, которая содержит информацию его частоте, не принимается во внимание.

В этой связи, перспективным видится использование корреляционной обработки акустического сигнала [1]. Алгоритм корреляционной обработки заключается в сопоставлении принятого сигнала с сигналом принятым в качестве образца. В качестве критерия совпадения принимается максимальное значение корреляционной функции  $R(T)$  вычисляемой по формуле

$$R(T) = \int_0^{\tau} U(t+T) \cdot \Psi(t) \cdot dt, \quad (4.22)$$

где  $T, t$  – параметры имеющие размерность времени;  $\tau$  – длительность образцового сигнала  $\Psi(t)$ ;  $U(t)$  – принятый сигнал.

Применительно к дискретным сигналам формулу (4.22) можно записать в виде

$$R_j = \sum_{i=0}^N u_{i+j} \cdot \psi_i, \quad (4.23)$$

где  $u_i$  –  $i$ -й отсчет принятого сигнала;  $\psi_i$  –  $i$ -й отсчет образцового сигнала длительностью  $N$  отсчетов.

На рис. 4.19 показаны результаты расчетов корреляционных функций для сигналов, приведенных на рис. 4.17 и рис. 4.18.

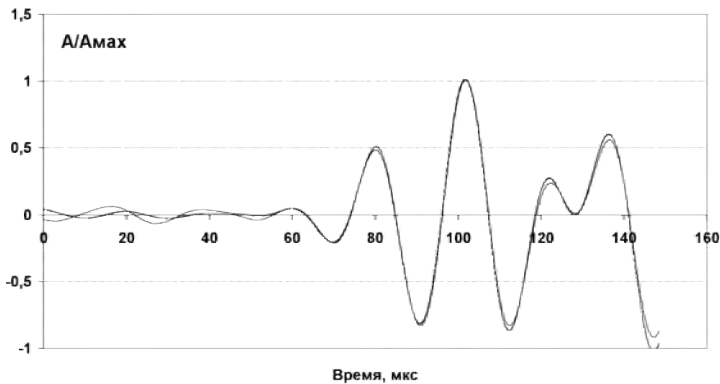


Рис. 4.19 – Диаграммы корреляционных функций для одиночного сигнала и усредненной серии

В качестве образцового (рис. 4.20,а) использовался фрагмент усредненной серии из 100 сигналов (рис. 4.17) длительностью 280 отсчетов, от момента времени 104 мкс. По рис. 4.19 видно, что максимума корреляционная функция усредненного сигнала достигает при  $T = 103,6$  мкс. Это значение времени можно рассматривать в качестве «истинного» времени распространения ультразвукового импульса.

Заметим незначительное различие корреляционных функций для одиночного (рис. 4.17) сигнала и усредненного ( $n=16$ ). Корреляционная функция одиночного сигнала сдвинута по оси времени на 1 отсчет (0,2 мкс), на рис. 4.19 эта разница не заметна.



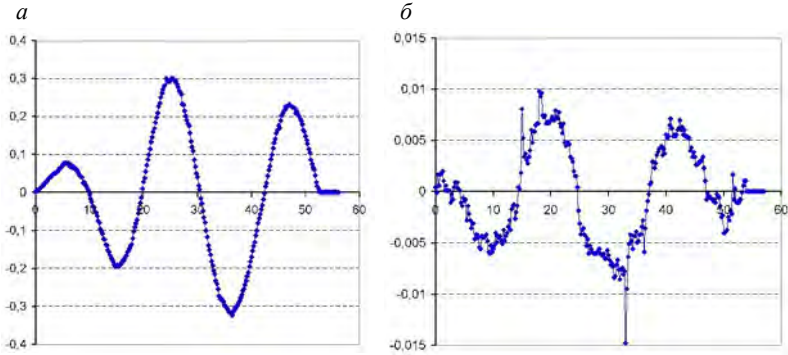


Рис. 4.20 – Диаграммы образцовых сигналов: *а* – «очищенный» сигнал; *б* – фрагмент одиночного сигнала

Заметим незначительное различие корреляционных функций для одиночного (рис. 4.17) сигнала и усредненного ( $n=16$ ). Корреляционная функция одиночного сигнала сдвинута по оси времени на 1 отсчет (0,2 мкс), на рис. 4.19 эта разница не заметна.

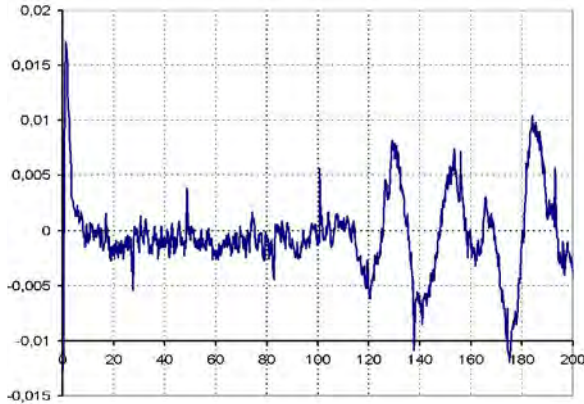


Рис. 4.21 – Временная диаграмма одиночного сигнала с низким отношением сигнал/шум

Представление о влиянии шумовой составляющей сигнала дают результаты расчетов корреляционных функций для одиночных сигналов с низким отношением сигнал/шум (рис. 4.21).

В качестве образцового сигнала (рис. 4.20, б) взяты 280 отсчетов «неочищенного» одиночного сигнала (рис. 4.17) с момента времени 112 мкс, который можно было визуальным образом зафиксировать в качестве начала фронта сигнала. На рис. 4.22 показана корреляционная функция для одного из одиночных сигналов. Как и для «чистого» образцового сигнала, эта корреляционная функция позволяет легко зафиксировать момент времени  $T_0$ , соответствующий ее максимальному значению:  $T_0 = 112$  мкс.

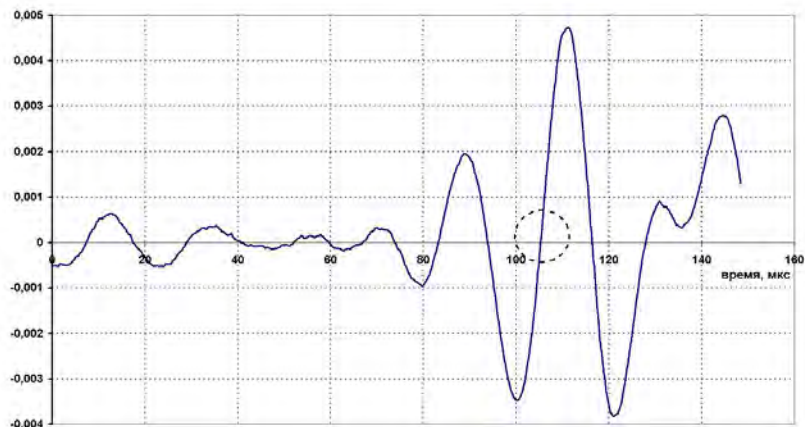


Рис. 4.22 – Диаграмма корреляционной функции для «зашумленного» сигнала

На рис. 4.23 показаны фрагменты корреляционных функций для трех одиночных сигналов в области максимума и в точках пересечения нулевого значения левым фронтом. Диапазон «дрожания» левого фронта центрального пика корреляционной функции не выходил за пределы  $\pm 0,25$  мкс от среднего значения, что на порядок меньше неопределенности регистрации положения фронта второго вступления; что, как можно заметить, на рис. 4.21 визуальным образом совершенно не обнаруживается.

Использование методики корреляционной обработки акустических сигналов позволило обеспечить надежную регистрацию импульса продольной подповерхностной волны в бетонных образцах на базах измерения превышающих 1...1,5 метра, при использовании типовых ЭАП с СТК.

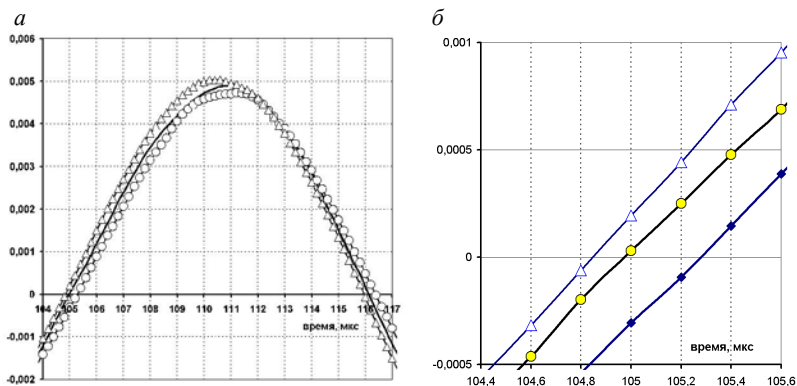


Рис. 4.23 – Область максимума корреляционной функции (а); область нулевого значения левого фронта

Импульс волны Релея регистрировался по всей длине монолитной бетонной плиты ( $L = 5 \dots 6$  м). Прямое сопоставление показателей типовых приборов с приведенными метрологическими показателями измерителя времени распространения УЗ импульса в бетоне на основе корреляционной обработки указывает на нераскрытые возможности современной приборной ультразвуковой техники.

#### 4.7 Акустическая нелинейность бетона

Эволюция дефектов структуры бетона при деформировании могут существенно менять его акустические свойства по сравнению с идеальным однородным аморфным материалом, хотя сопутствующие изменения упругих модулей при этом могут оставаться очень незначительными. Общим свойством макро-, мезо- и микроструктурных дефектов бетона является их многократно повышенная «мягкость» по сравнению с окружающим однородным упругим материалом [73, 74]. Различные модели трещин согласованно показывают, что трещина с характерными раскрытием  $d$  и диаметром  $L$  может быть полностью закрыта при создании в окружающем материале средней деформации сжатия  $\varepsilon \sim d/L \ll 1$  [69]. Это означает, что податливость (мягкость) трещины примерно в  $L/d$  раз выше, чем окружающего однородного материала, причем, вполне типичными для реальных трещин являются значения  $L/d \sim 10^3 \dots 10^5$ . Аналогич-

ным образом, в силу малости площади соприкосновения, у контактов между гранулами локальная жесткость оказывается многократно ниже, чем у объема зерен. Повышенная мягкость таких структурных особенностей приводит к многократному увеличению их деформации в поле упругой волны, вплоть до «закрытия», вследствие чего, на таких «мягких» дефектах будут наблюдаться как заметные отклонения от линейного соотношения между напряжением и деформацией, так и потери энергии упругих возмущений.

В то же время, вследствие структурной неоднородности и анизотропии, внешняя нагрузка трансформируется в массиве бетона в неоднородное поле напряжения, в котором структурные элементы и дефекты проявляют себя как концентраторы напряжений на всех масштабных уровнях неоднородности. Известно, что разнородность компонентов – матрицы и включений – проявляются в виде скачка физических параметров на границе раздела, что непосредственно влияет на параметры формирования поля напряжения и деформаций. На рис. 4.24 представлены модели распределения напряжений в объеме системы «матрица» М – «включение» В, при вариации свойств включения по отношению к матрице.

По данным [31] для типовых составов тяжелого бетона на гранитном заполнителе при напряжении  $\sigma_0=17$  МПа, максимальное значение напряжения на границах крупного заполнителя может достигать 45..50 МПа. В местах концентрации напряжений возрастает вероятность образования микрообъемов материала с разрыхленной структурой. С повышением напряжения или увеличением времени его действия здесь могут возникнуть микротрещины, в свою очередь вызывающие концентрацию напряжений и дальнейшее интенсивное развитие дефектов структуры. В то же время, образование микротрещин, способствует перераспределению напряжений, снижению их концентрации и торможению процесса развития дефектов. При этом, каждому напряжению будет соответствовать свой уровень развития процесса образования микротрещин, вплоть до их объединения и разрушения бетона.

При достаточно большой концентрации дефектов, у бетона могут наблюдаться выраженные нелинейные акустические свойства. Проявляться которые могут различными эффектами:

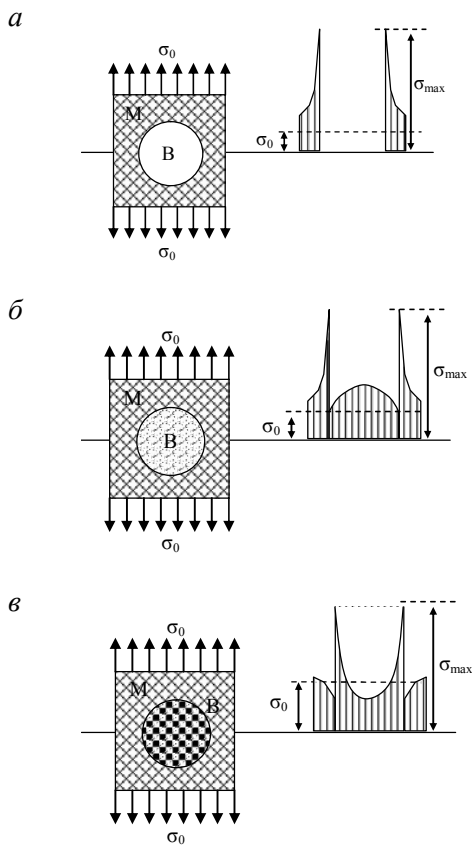


Рис. 4.24 – Модели распределения напряжений в объеме системы «матрица» М – «включение» В при вариации свойств включения по отношению к матрице (по данным [31]): *а* – газофазовое включение; *б* – твердофазовое включение с модулем упругости меньшим чем у матрицы; *в* – твердофазовое включение с модулем упругости большим чем у матрицы

- обогащением частотного спектра акустических колебаний в бетоне по отношению к спектру инициирующих колебаний и зависимости амплитуд спектральных составляющих от механического напряжения;

- акустической упругостью – зависимостью скорости распространения акустической волны и её затухания от напряжения (деформации) бетона;

- зависимостью резонансной частоты колебаний бетонного образца от амплитуды возбуждающих колебаний;
- изменением акустико-эмиссионной активности бетона при его механическом нагружении.

### *Частотно-спектральные эффекты*

Эффективным инструментальным методом оценки проявления нелинейности, по мнению ряда исследователей [31, 47, 49, 129, 133] является спектральный частотный анализ. Аппарат частотно-спектрального анализа нелинейных акустических процессов в материалах в значительной степени заимствован из радиотехники и теории обработки и преобразования сигналов, о чем может свидетельствовать даже некоторая используемая терминология. Основные нелинейные частотные эффекты определяются характером нелинейной функции, связывающей локальные физико-механические параметры материала – напряжение  $\sigma$ , и относительную деформацию  $\varepsilon$ , и характер воздействия, которое обычно рассматривается как комбинация гармонических колебаний. В нелинейных методиках эффективными оказываются даже самые простые нелинейные эффекты, такие как генерация высших гармоник, генерация колебаний с суммарной и разностной частотой по отношению к возбуждающим колебаниям, самодетектирование (демодуляция) модулированной первичной волны.

Генерация гармоник - колебаний с кратными частотами - может быть описана известными из спектрального анализа соотношениями (рис. 4.25). В частности, если в качестве нелинейности рассматривать параболические функции, то кратное умножение частот следует из формул:

$$\begin{aligned} \cos^2 \omega &= \frac{1}{2}(1 + \cos 2\omega), \\ \cos^3 \omega &= \frac{1}{4}(3 \cos \omega + \cos 3\omega) \end{aligned}$$

В качестве нелинейного элемента можно рассматривать трещину, находящуюся в поле переменного напряжения  $\sigma \sim$ , возбуждаемого акустической волной (рис. 4.26), которое является достаточным, чтобы происходило контактное взаимодействие (схлопывание) берегов трещины. Нелинейность возникает из-за несимметричной ха-

рактические характеристики нагружения области трещины, жесткость которой в стадии сжатия (после схлопывания) будет выше, чем при растяжении.

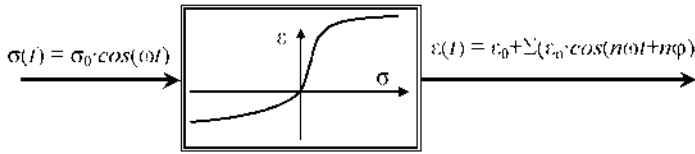


Рис. 4.25 – Генерация гармоник нелинейным элементом:  
 $\omega$  – частота возбуждающих колебаний,  $n = 1, 2, \dots$

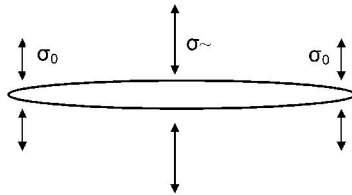


Рис. 4.26 – Модель схлопывающейся трещины

В поле гармонически изменяющегося напряжения  $\sigma_{\sim}$ , инициированной проходящей волной, возникнут искажения формы колебаний (рис. 4.27). Модуляция инициирующего гармонического напряжения  $\sigma(t) = \sigma_0 \cos \omega t$  диодной характеристикой трещины приведет к расширению частотного спектра колебаний и появлению упругих волн с частотой кратной основной  $\omega$ , причем преобладающими будут четные гармоники, с частотами  $\omega_{2n} = 2n \cdot \omega$ .

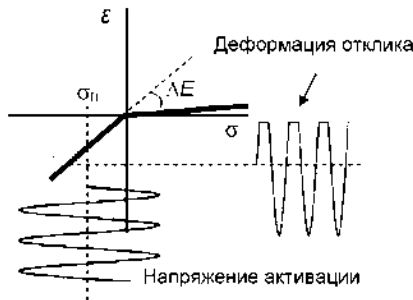


Рис. 4.27 – Модель механического диода:  $\Delta E = [E + (d\sigma/d\epsilon)_{\epsilon > 0}]$ ,  
 $E$  – модуль упругости материала

Для деформации сдвига (рис. 4.28) в зоне раскрытия трещины можно ожидать проявления механизма сухого трения, который будет приводить к возникновению гистерезиса в характеристике  $\sigma - \epsilon$ , и нелинейности типа «ограничение» вследствие взаимодействия микронеровностей на поверхностях трещины [129].

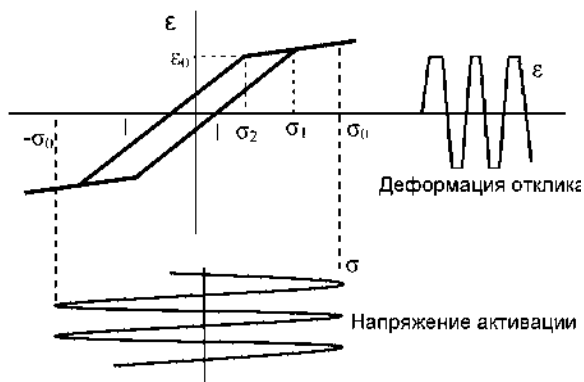


Рис. 4.28 – Модель механического диода (слева); искажение формы волны (справа)

Показано [129, 134, 135], что нелинейное гистерезисное поведение в значительной степени доминирует с нелинейной реакцией для бетона. Это взаимодействие независимо от направления деформации сдвига вызывает дважды в течение периода инициирующего напряжения вариацию жесткости. Симметричная модель нелинейности приводит к появлению в спектре отклика значительного уровня нечетных гармоник, с частотами  $\omega_{2n-1} = (2n - 1) \cdot \omega$ .

Помимо генерации высших гармоник, эксперименты [128] также показали, что различные условия *контактной акустической нелинейности* (КАН) [129], могут значительно расширять нелинейные спектры дефектов типа трещина. Могут проявляться различные формы динамической неустойчивости, то есть значительного изменения характера реакции для небольшой вариации входных параметров. Появление дополнительных мод колебаний объясняется [128, 129] тем, что трещина обладает кроме нелинейных так же и резонансными свойствами. Характеристическая частота  $\omega_0$  такого резонатора определяется линейной жесткостью и присоединенной массой области разрыва сплошности (рис. 4.29) в трещине. Механизм контактной нелинейности можно представить как смещение  $x$ ,



вызываемое внешней силой активации  $f(t)$  и нелинейной составляющей  $F^{NL}(t)$ . Ведомые колебания смещения  $x$  нелинейного генератора могут быть найдены как решение нелинейного уравнения:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = f(x) + F^{NL}(x), \quad (4.24)$$

где активирующая сила  $f(x) = f_0 \cdot \cos(\theta t)$ .

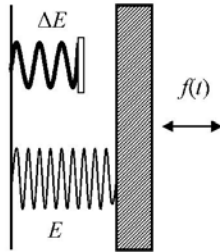


Рис. 4.29 – Резонансная модель трещины [129]

При значительном факторе нелинейности  $F^{NL}$ , - рассматривая ее как нелинейность второго порядка, и превышении амплитудой активирующей силы  $f$  порогового значения  $A1$ , возникает так называемый субгармонический резонанс, если  $\theta \approx 2\omega_0$ . Присутствие нелинейностей высшего порядка обеспечивают следующее соотношение частот активации и субгармоник:

$$\omega_0 \approx \frac{m\theta}{n+1}, \quad (4.25)$$

где  $m$  и  $n$  – целые числа.

Если геометрия плоскостей трещины или физико-механические характеристики среды имеют различия, то частот резонанса может быть несколько. В частности, если речь идет о трещинах на границе крупный заполнитель – матрица. В этом случае трещину можно рассматривать как два взаимосвязанных резонатора с резонансными частотами  $\omega_\alpha$  и  $\omega_\beta$  (рис. 4.30), где частота  $\omega_\alpha$  может соответствовать частоте стоячей волны Релея распространяющейся в песчано-цементной матрице, а частота  $\omega_\beta$  – частоте такой же волны, распространяющейся по поверхности крупного заполнителя. Аналогичной можно рассматривать картину резонанса поверхностных волн, рас-

пространяющихся во взаимно-перпендикулярных направлениях в плоскости трещины.

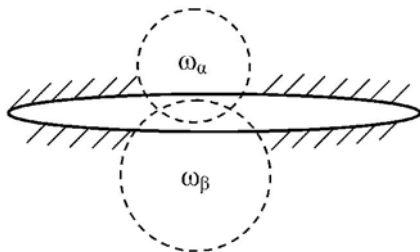


Рис. 4.30 – Модель трещины в виде двух связанных резонаторов [129]

В первом приближении резонансная частота может рассматриваться как частота стоячей волны Релея, ограниченной пространством вершин трещины. Линейный размер трещины будет соответствовать половине длины волны. В этом случае резонансную частоту  $\omega_R$  одного из берегов трещины можно определить из соотношений:

$$\omega_R = 2\pi f_0 = \frac{C_R}{2l} = \frac{0.85 + 1.12 \cdot \nu}{2l \cdot (1 + \nu)} \cdot \sqrt{\frac{E_0}{2\rho(1 + \nu)}}, \quad (4.26)$$

где  $E_0$  - модуль упругости,  $\rho$  – плотность бетона,  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $l$  – длина трещины.

По оценкам [129] для трещины с линейным размером  $l = 0,01$  м для бетона с  $E_0 = 30$  ГПа;  $\rho = 2,2 \cdot 10^3$  кг·м<sup>-3</sup>;  $\nu = 0,2$ ,  $\omega_0 = 106,5$  кГц, что лежит в рабочем диапазоне частот типовых приборов ультразвукового контроля бетона. Резонансный механизм поглощения энергии проходящей ультразвуковой волны трещинами и неоднородностями объясняет сильную частотную зависимость коэффициента затухания ультразвука в бетоне.

На рис. 4.31 представлены по данным [115] частотные спектры акустического отклика бетонного образца-призмы, демонстрирующие чувствительность нелинейного акустического метода к микроструктурным изменениям бетона после его нагружения.

До нагружения образца (рис. 4.31, а) уровень второй гармоники – 2Н на 25...30 дБ (17...30 раз) ниже уровня основных колебаний. Нагружение бетонного образца (рис. 4.31,б) приводит к перераспределению энергии составляющих спектра: уровень второй гармоники

возрастает на 16...20 дБ, а уровень более высоких гармоник – третьей, четвертой – понижается на 20 дБ. Более высокие номера гармоник – пятой и выше зарегистрировать не удается.

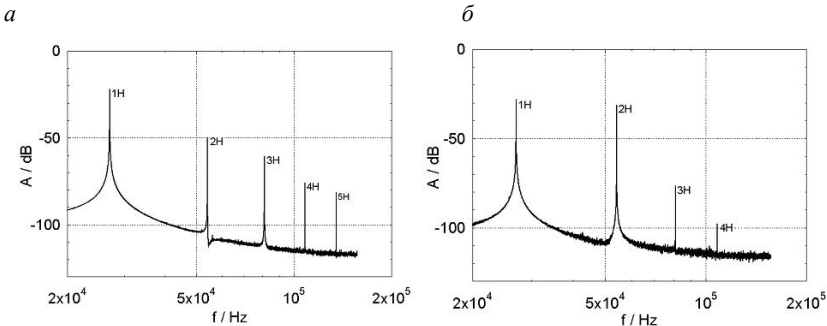


Рис. 4.31 – Частотные спектры акустического отклика бетонной призмы 400x100x100 мм: *a* – до нагружения; *б* – после нагружения ( $\sigma_{\max} \approx 0,9f_c$ ) [115]

В то же время имеются экспериментальные данные испытаний [136] образцов каменной соли и ангидрита у которых наблюдался выраженный эффект акустической упругости (рис. 4.35, рис. 4.36) сопоставимый с показателями бетона, но эффект генерации дополнительных частотных спектральных составляющих зарегистрирован не был.

Проведение частотно-спектральных натуральных экспериментов на бетонных образцах с вводом инициирующих колебаний через поверхность образца требует тщательной проверки на «линейность» всех компонентов измерительного тракта, наиболее критичными из которых является сам излучатель-вибратор и его акустический контакт с поверхностью бетона. Механическое взаимодействие протектора вибратора с микронеровностями поверхности бетона, где достигаются максимальные динамические напряжения, может создавать нелинейный эффект, превышающий эффекты нелинейности контролируемой среды. Указанное обстоятельство является слабой стороной частотно-спектральных методов испытаний материалов и бетона в частности, затрудняющей их практическое использование.

## *Акустическая упругость бетона*

Эффект акустической упругости заключается в зависимости параметров распространения акустической волны или показателей акустической анизотропии испытуемого материала от напряжения (деформации). В основе эффекта акустической упругости лежит проявление нелинейных свойств областей бетона всех масштабных уровней локализации [64, 65, 71]. Это может быть изменение жесткости механических контактов структурных элементов бетона – кристаллогидратов между собой и зёрнами заполнителя. Это могут быть нелинейные эффекты трещиноватости, рассмотренные выше, связанные с локальным изменением модуля упругости бетона. Это могут быть эффекты «схлопывания» трещин.

На рис. 4.32 приведена компьютерная реконструкция [131] процесса прохождения импульса волны сжатия через плоскую трещину. Если для линейного дефекта процесс протекает «классически» - волна огибает трещину, то нелинейность приводит к «просачиванию» иницирующего импульса, что проявится в увеличении скорости распространения акустического импульса в зоне трещины.

При стационарном возбуждении свободных колебаний в испытательном образце в режиме автогенерации (рис. 3.1), зависимость скорости распространения акустической волны от её интенсивности может «замкнуться» контуром положительной обратной связи, то есть, нарастание амплитуды свободных колебаний будет приводить к росту скорости волны и росту резонансной частоты, что, в свою очередь, может скачкообразно снизить уровень возбуждения и, следом, - резонансную частоту образца. Периодическое повторение этого процесса приведет к генерации релаксационных субгармонических колебаний. Частота таких составляющих будет определяться не только размерами, плотностью и макроупругостью образца, но и добротностью резонансной характеристики исследуемой системы «образец – возбуждающий преобразователь». На рис. 4.33 показаны диаграммы резонансных характеристик для разных уровней мощности возбуждения.

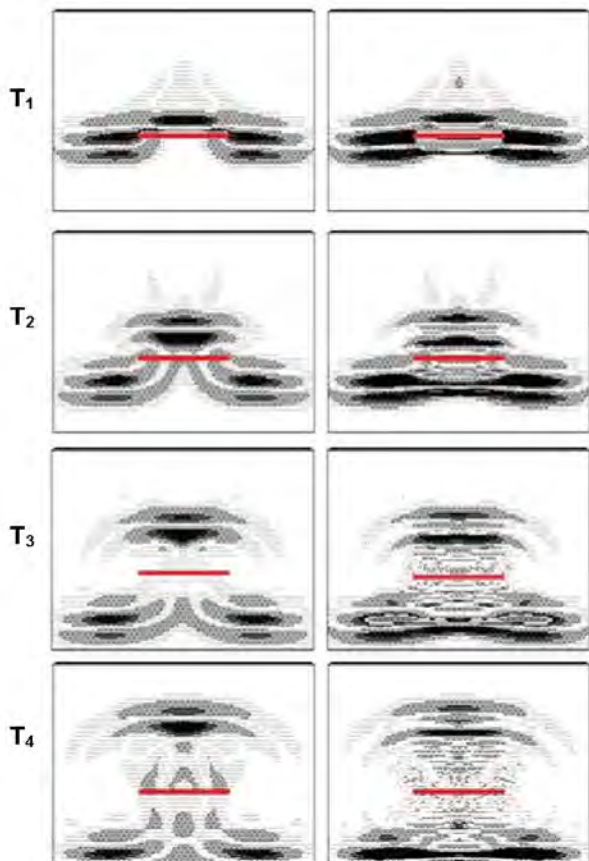
*a**б*

Рис. 4.32 – Конечноэлементное моделирование прохождения нормальной ультразвуковой волны через планарную трещину [131]: *a* – без учета нелинейности дефекта; *б* – с учетом нелинейности

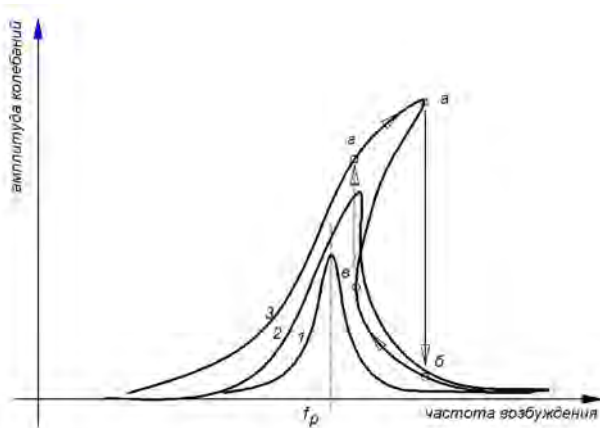


Рис. 4.33 – Частотные характеристики колебательной системы с элементом нелинейности: 1 – характеристика при малом уровне возбуждения; 2 – при промежуточном уровне возбуждения; 3 – характеристика при уровне возбуждения, обеспечивающем циклический «перескок» частоты и амплитуды колебаний

Кривая 1 соответствует классической резонансной кривой, наблюдаемой при отсутствии проявления нелинейных эффектов. Резонансная частота  $f_p$  определяется лишь геометрией образца, его модулем упругости и плотностью. Кривая 2 – резонансная кривая, у которой наблюдается влияние нелинейности – резонансная частота смещается в сторону высоких значений, при этом нарушается симметрия скатов кривой. Кривая 3 – вырожденная резонансная кривая, у которой наблюдается неоднозначность амплитуд при одинаковых значениях частоты. При определенных условиях происходит «перекачка» по контуру <а-б-в-г> энергии возбуждающих колебаний в более низкие релаксационные колебания (субгармоники), которыми будет модулирована амплитуда основной частоты.

Таким образом, общей физической основой частотно-спектральных эффектов и акустической упругости бетона является нелинейность упруго-деформационных показателей локальных областей его структуры.

Эффектом просачивания фронта упругой волны через трещины можно объяснить увеличение скорости ультразвуковых колебаний распространяющихся вдоль оси образца, при его осевом сжатии. На рисунке 4.34 приведена зависимость скорости ультразвукового им-

пульса с максимумом спектральной плотности на частоте 55 кГц от напряжения сжатия. Акустические испытания производились в режиме прямого измерения времени распространения продольной подповерхностной волны ультразвукового импульса в образцах-призмах 100x100x400 мм поверхностным методом прозвучивания на базе 150 мм.

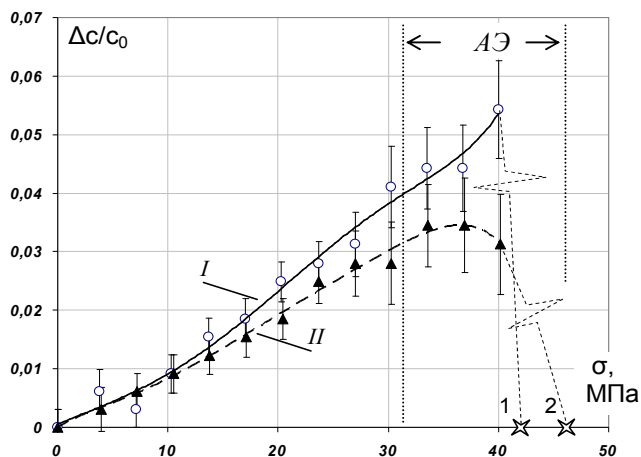


Рис. 4.34 – Зависимость приращения скорости продольной ультразвуковой волны в образцах-призмах от статической осевой нагрузки: I – класс бетона С30/37; II – С35/45; (условия твердения нормальные, возраст бетона 370 сут.); 1, 2 – значения разрушающей нагрузки; АЭ – область интенсивной акустической эмиссии в образцах

Эффект акустической упругости устойчиво наблюдается при нагрузках более 20% от разрушающей. При этом возрастание модуля упругости бетона не зафиксировано. В таблице 4.3 приведены максимальные значения коэффициентов акустической упругости для различных составов бетона, полученные экспериментально. В качестве параметра акустической упругости  $k_A$  использовано отношение

$$k_A = \frac{\Delta V_l}{V_l} \frac{1}{\sigma}, \quad (4.27)$$

где  $V_l$  – скорость распространения импульса подповерхностной продольной волны;  $\Delta V_l$  – приращение скорости акустического импульса при осевой нагрузке  $\sigma$ .

Таблица 4.3 – Параметры акустоупругости бетона

№ состава	Класс по прочности	$f_{c,cube}$	Расход песка	Расход щебня	Расход цемента*, ПЦ-500	Параметр акуст. упругости** $\Delta v \cdot v^{-1} \cdot \sigma^{-1}$
		МПа	кг	кг	кг	$10^{-9} \text{ Па}^{-1}$
1	C25/30	34,3	750	1100	445	1,30±0,25
2	C35/45	50,2	710	1000	600	1,45±0,31
3	C30/37	42,8	730	1050	540	1,25±0,27
4	C35/45	48,4	700	1030	600	0,91±0,20

\*Вода на осадку конуса = 13...15 см

\*\* Контрольное напряжение  $\sigma_c = 20 \text{ МПа}$

Из таблицы 4.3 видно, что приращение скорости распространения акустического импульса при нагрузке 20 МПа лежит в пределах 1...1,5 %, при этом относительная погрешность в оценке  $k_A$  составляет ~20%. Следует заметить, что среднее квадратическое отклонение относительной вариации скорости, рассчитанное по формуле

$$s_{\Delta v^*} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\Delta V_i / V_i - (\Delta V_i / V)_{m(n)}]^2}{n-1}} \quad (4.28)$$

остается практически постоянным в диапазоне напряжений  $0...0,7f_c$ , следствием чего является возрастание относительной погрешности в оценке коэффициента  $k_A$  по мере уменьшения напряжения в бетоне. Указанная погрешность при  $\sigma = 0,1f_c$  составляет 50...70%. Некоторые методические приемы повышения точности оценки показателя акустической упругости бетона, в частности, использованием больших баз прозвучивания, рассмотрены в разделах 4.5 и 4.6.

Для сопоставления ниже приведены данные [136] акустической упругости образцов каменной соли и ангидрита (минерала безводного гипса) – материалов структурно однородных (в сравнении с бетоном), но которым также присуща трещиноватость разного масштаба уровня.

На рис. 4.35 приведены зависимости скорости распространения ультразвукового импульса частотой около 500 кГц в коротких образцах-кернах минерала ангидрита.



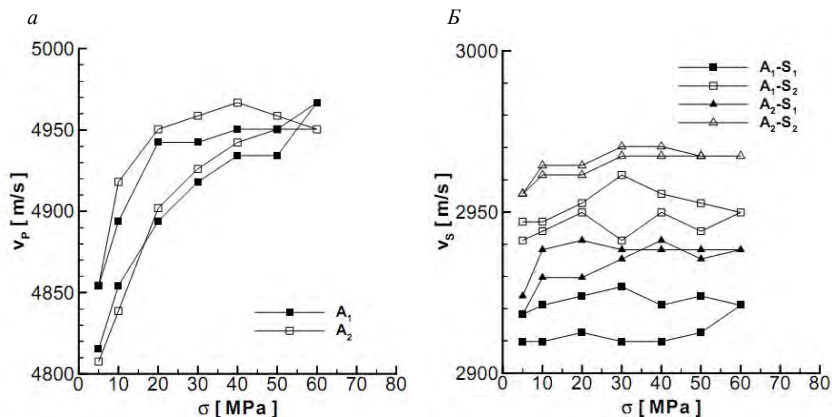


Рис. 4.35 – Зависимости скорости распространения акустических волн в образцах минерала ангидрита от напряжения при одноосном сжатии: *а* – продольной волны, *б* – поперечной [136]

Измерение скорости распространения импульса производилось в направлении сжатия образца. Максимальное значение показателя акустической упругости для продольных волн  $k_A$ , соответствующее начальному участку диаграммы, составило в среднем  $1,4 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$ . Характерным явилось слабое проявление эффекта акустической упругости для поперечных волн (рис. 4.35,б).

На рис. 4.36 приведены данные испытаний двух групп образцов-кернах каменной соли: группа *Berlin 1* – «свежие» образцы-керна, группа *Berlin 2* – образцы-керна выдержанные в нормальных условиях в течение года [136].

Показатель акустической упругости каменной соли лежит в пределах от  $5 \dots 10 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$  (группа *Berlin 1*, начало диаграммы нагружения), до  $0,1 \dots 0,2 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$  – (группа *Berlin 2*, конечный участок диаграммы нагружения).

Деструктивные процессы в бетоне вследствие термических воздействий также могут выявляться показателем акустической анизотропии с использованием ультразвука. Важным его качеством является высокая чувствительность к анизотропии физико-механических параметров бетона при нагружении.

На рис. 4.37 приведены зависимости отношений скорости распространения импульса продольной волны в осевом и радиальном направлениях цилиндрического бетонного образца, подвергавшегося-

ся термическому воздействию [124]. Приведенные зависимости также косвенно свидетельствуют о снижении предела прочности бетона образцов после термического воздействия, превышающего 200°C.

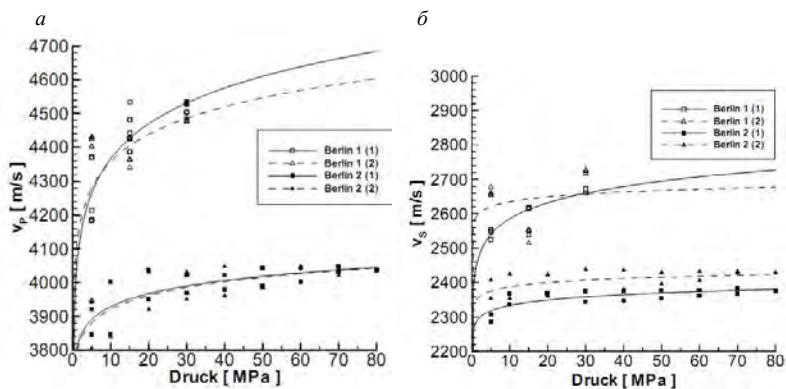


Рис. 4.36 – Зависимости скорости распространения акустических волн в направлении сжатия в коротких образцах-кернах каменной соли от напряжения при одноосном сжатии: *a* – продольной волны, *б* – поперечной [136]

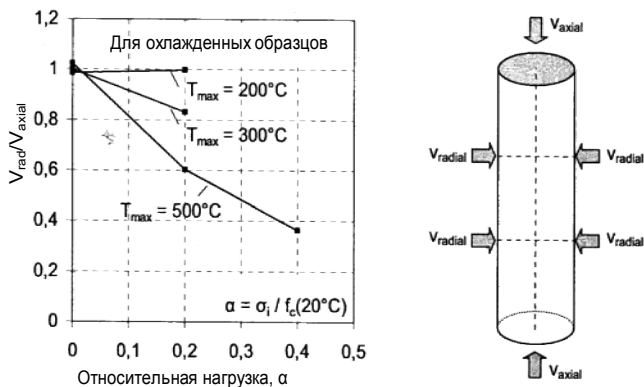


Рис. 4.37 – Зависимость отношения скорости распространения ультразвукового импульса продольной волны в продольном и радиальном направлениях от относительной осевой нагрузки цилиндрического бетонного образца [124]

\* \* \*

Полученные данные экспериментальных оценок показателя акустической упругости, наряду с его анизотропией, позволяют рассматривать этот показатель в качестве перспективного информационного параметра для контроля напряженно-деформированного состояния бетона непосредственно в конструкциях. Использование алгоритмов накопления и корреляционной обработки акустического сигнала позволяет на порядок улучшить метрологические показатели ультразвуковых приборов контроля бетона и, тем самым, обеспечить измерительную основу метода контроля его НДС.

## ГЛАВА 5

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ УПРУГИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В БЕТОННОМ МАССИВЕ

Одним из важных, но не получивших до недавнего времени удовлетворительного решения вопросов, возникающих при разработке акустических методов и приборных средств неразрушающего контроля бетона, является создание математической компьютерной модели тракта прохождения упругой волны зондирующего сигнала в исследуемом материале – бетоне.

Создание такой модели трудно переоценить как для теории неразрушающего контроля бетона, так и для практики конструирования приборных средств: электроакустических преобразователей, усилительного и излучающего трактов и др. Используемые в настоящее время эмпирические и полу- эмпирические модели связи физико-механических характеристик бетона и информационных косвенных параметров зондирующего сигнала базируются исключительно на экспериментальных, зачастую весьма разрозненных данных и упрощенных представлениях о механизме их взаимовлияния, и носят сегментарный характер, выражающийся в узкой применимости таких моделей. Изменение условий проведения измерений, применение разнотипных средств контроля и, что особенно важно - нестабильность технологии бетонных работ приводят к необходимости подбирать другую модель. В практике неразрушающего контроля упруго-прочностных характеристик бетона это выражается в «подборе» соответствующей тарировочной кривой. Кроме того, такого рода эмпирические модели, не отражая «физику» процесса, не позволяют проводить вычислительные эксперименты по выявлению новых косвенных информационных параметров, оценивать их информационную эффективность.

Не менее важным, для разработчиков приборных средств, является использование моделей волновых процессов в качестве инструментального средства для ориентировочной оценки параметров акустического сигнала прошедшего через среду с изменившимися свойствами, в тех случаях, когда экспериментальное определение этих параметров связано с определенными техническими трудно-

стями, материальными издержками и затратами времени. Одной из первых решенных авторами на основе сформированной программной модели задач была сравнительная оценка уровней (амплитуд) составляющих акустического сигнала в бетоне для случая возбуждения его поверхности ЭАП с точечным акустическим контактом и различным направлением вектора колебательной скорости протектора. Решение этой задачи позволило уточнить конструкции ЭАП, определиться в выборе характеристик приемно-излучающего тракта прибора контроля, использованных в исследовательских работах по неразрушающему контролю бетона. Кроме того, моделирование позволило уточнить ряд вопросов связанных с влиянием армирования и поверхностных трещин в зоне контроля на параметры акустического импульса

При частоте 50..60 кГц и скорости распространения  $4000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  длина волны составит около 7 см, что для большинства строительных конструкций значительно меньше габаритов сечений. Поэтому независимо от конкретного способа создания колебаний бетонную конструкцию можно рассматривать относительно зоны возбуждения колебаний как полубесконечное пространство. В этом случае в волновой картине можно выделить три составляющих: продольные, поперечные и поверхностные волны. Они отличаются своей интенсивностью и скоростью распространения в массиве. На рис. 5.1 и рис. Б.1...Б.2 (см. прил. Б) представлена визуализация развития волнового процесса в цилиндрическом образце при возбуждении волны тангенциальным вектором в центре торца образца, полученная методом конечно-элементного (КЭ) моделирования.

Смещение узлов модели отображается яркостью соответствующих участков модели. Волновая картина соответствует моменту, когда импульс продольной волны достиг края модели. Состояние модели для других моментов времени приведено в приложении Б.

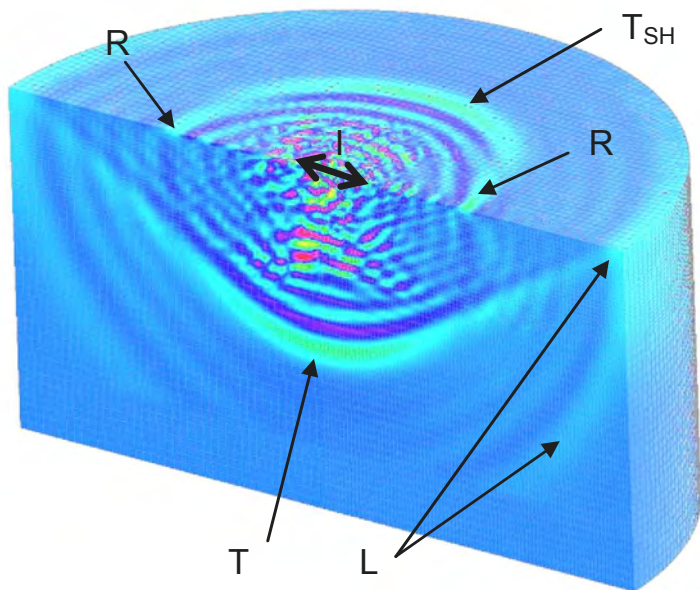


Рис. 5.1 – Визуализация волнового процесса в цилиндрической модели при его возбуждении тангенциальным импульсом в центре образца для момента времени 93 мкс после инициации импульса  
*T* – фронт объемной поперечной волны, *L* – фронт продольной волны, *R* – фронт волны Релея, *T<sub>SH</sub>* – фронт поперечной волны поляризованной в плоскости модели, *I* – иницирующий вектор силы

Контроль протяженных бетонных и железобетонных конструкций удобно производить при одностороннем доступе к поверхности, когда иницирующий и приемный преобразователи устанавливаются на одной стороне (границе) конструкции. При этом отпадает необходимость в измерении меняющейся базы прозвучивания, что необходимо при сквозном прозвучивании конструкций. Поэтому метод так называемого поверхностного прозвучивания (ГОСТ 17624) получил в практике ультразвукового контроля бетона наибольшее распространение. В связи с этим, определенный интерес представляет оценка потенциальной возможности использования указанных выше типов волн зондирующих колебаний для поверхностного прозвучивания. Заметим, что ни старой редакцией ГОСТ 17624-87 ни новой - ГОСТ 17624-2012 [13] не регламентиру-

ется тип используемой волны зондирующего бетон импульса. В то же время, во всех без исключения существующих приборах ультразвукового контроля прочности бетона в качестве информационного параметра фактически используется скорость/время распространения импульса продольной волны.

### 5.1 КЭ модель для исследования распределения упругих колебаний в однородном бетонном массиве

Решение задачи моделирования пространственного распределения акустических колебаний было выполнено применительно к бетонному образцу, свободно опирающемуся по контуру (рис. 5.1).

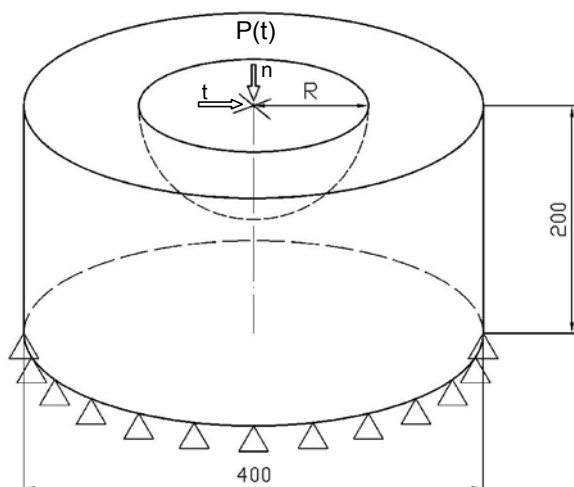


Рис. 5.2 – Моделируемый бетонный образец:  $P(t)$  - вектор инициирующей силы  
 $R$  – радиус поверхности регистрации параметров акустических волн

Указанные на рис. 5.2 размеры образца были приняты по следующим соображениям. С одной стороны, минимальные размеры модели ограничены минимальной базой прозвучивания, использовавшейся при натурных испытаниях бетона ( $l=10$  см). При этом, учитывая, что скорость поперечных волн и волны Релея примерно в два раза ниже скорости продольных волн, внешние границы образца пришлось «отодвинуть» на  $2l$  от точки возбуждения, для того, что-

бы отраженные от граней образца волны не интерферировали с медленными поперечными в зоне приема ( $R=10$  см), на протяжении 1...2 полупериодов волны с  $T/2=7$  мкс. Безусловно, увеличение размеров модельного образца было бы желательным, так как позволило бы проанализировать волновой процесс в нем на большем временном интервале. Но значительное возрастание, при этом, времени расчета конечно-элементной модели заставило ограничиться указанными размерами.

Точка приложения импульса силы - центр верхней грани цилиндра. Инициация волны производится приложением импульса силы, что ближе к реальному механизму возбуждения акустических импульсов пьезоэлектрическими преобразователями, чем альтернативный вариант – импульсом смещения. Временные параметры силового воздействия также выбраны из условия приближения к реальному силовому воздействию, создаваемому точечным протектором электроакустического преобразователя, и описывается выражением

$$P(t) = P_{\max} \cdot [1 - \exp(-0.5t)] \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{T}, \quad (5.1)$$

В качестве упрощенного варианта описания импульса возбуждения использована половина синусоиды.

$$P(t) = P_{\max} \cdot \text{Sin} \frac{\pi \cdot t}{T}, \quad 0 \leq t \leq T; \quad (5.2)$$

для  $0 \leq t \leq T$ , где  $T$  – половина периода.

Модели рассчитывались для двух вариантов силового воздействия: нормального к поверхности; и тангенциального – касательного к поверхности.

Амплитуда воздействия  $P_{\max}$  принималась равной 1 Н, длительность воздействия  $T$ , для двух вариантов моделирования, принималась равной  $1 \cdot 10^{-6}$  с,  $7 \cdot 10^{-6}$  с и  $21 \cdot 10^{-6}$  с (рис. 5.3).

Принятые характеристики материала бетонного цилиндра:

- модуль упругости  $E=20$  ГПа;
- модуль сдвига  $G=8$  ГПа;
- коэффициент Пуассона  $\nu=0,2$ ;
- плотность  $\rho=2500$  кг·м<sup>-3</sup>.



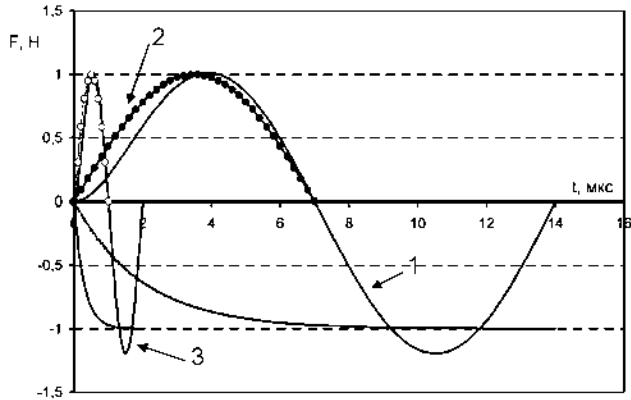


Рис. 5.3 – Временные диаграммы импульсов возбуждения:  
 1, 3 – полупериодический по формуле (5.1),  
 2 – полупериодический по формуле (5.2)

Принятая дискретность разбиения модели составляет 4 мм с применением параболической интерполяции перемещений между узлами конечного элемента (КЭ). Число КЭ составляет 5000, число узлов – 10201. Необходимо отметить, что время расчета модели при указанных её характеристиках составило на компьютере класса P-4 (2,4 ГГц) около 1,5 часа. Расчет же объемной модели для варианта тангенциального вектора возбуждения при такой же разбивке потребовал более 12 часов, что налагает серьезные ограничения на достигаемую точность моделирования, в частности для модели с длительностью возбуждения 1 мкс. (Расчет объемной модели с шагом разбивки 1 мм потребовал около 30 часов).

Тип решаемой задачи MSC/Nastran for Windows – *Transient Dynamic/ Time History* – анализ переходных процессов во времени.

Метод решения задачи – *Direct Transient* – прямой переходной процесс.

Данный метод решения поставленной задачи сводится к прямому интегрированию разрешающих уравнений движения системы [76]

$$[M]\{u''\} + [C]\{u'\} + [K]\{u\} = \{R\}, \quad (5.3)$$

где  $[M]$  – матрица масс модели,  $[C]$  – матрица демпфирования,  $[K]$  – матрица жесткости,  $\{R\}$  – известный вектор внешней нагруз-

ки, зависящий от времени,  $\{u\}$  – неизвестный вектор перемещений узлов конечно-элементной модели, зависящий от времени.

Демпфирование не учитывалось – коэффициент структурного демпфирования  $G=0$ .

Начальные условия – ускорение свободного падения  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ .

Число шагов во времени – 200.

Приращение времени на шаге –  $0.5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ .

Вывод результатов осуществлять на каждом 2 шаге.

Результаты расчета – перемещения узлов модели.

## *5.2 Анализ данных моделирования упругих волн возбуждаемых нормальным вектором силы*

На рис. 5.5 и 5.6 приведены расчетные временные диаграммы динамической деформации в точках, лежащих в вертикальной плоскости и отстоящих от точки возбуждения на расстоянии  $R=10 \text{ см}$  (рис. 5.2). Импульс возбуждения нормальный к поверхности образца, длительность - 7 мкс, форма описывается графиком 2 (рис. 5.3). Диаграмма рис. 5.5 отображает продольные (радиальные) составляющие волнового процесса, диаграмма рис. 5.6 – поперечные. Началу фронта первого вступления продольной волны соответствует время  $\sim 30 \text{ мкс}$ , что соответствует скорости распространения  $c_1 = 0,01/30 \cdot 10^{-6} = 3333 \text{ м/сек}$ , и это значение скорости остается одинаковым, как для объемных, так и для подповерхностных продольных волн.

Пространственное распределение амплитудных значений смещения узлов представлено на рис. 5.4.

Максимальное значение акустический импульс имеет в точке, находящейся на оси вектора возбуждающей силы, что соответствует режиму сквозного прозвучивания.

Отклонение от оси приводит к плавному снижению интенсивности импульса. Минимальное значение -  $1,7 \cdot 10^{-11} \text{ м}$  достигается на поверхности образца (режим поверхностного прозвучивания), и составляет около 17% от максимального.

Отчетливо проявила себя волна Релея (поверхностная волна), представляющая собой комбинацию трансформирующихся друг в друга продольных и поперечных составляющих. Для сопоставле-

ния, на рис. 5.5 приведена временная диаграмма поперечной составляющей волны (график 3). Временной сдвиг кривых 2 и 3 составляет  $\frac{1}{4}$  периода колебаний, что свидетельствует об эллиптической форме траектории движения точки поверхности образца, под влиянием данного типа волны.

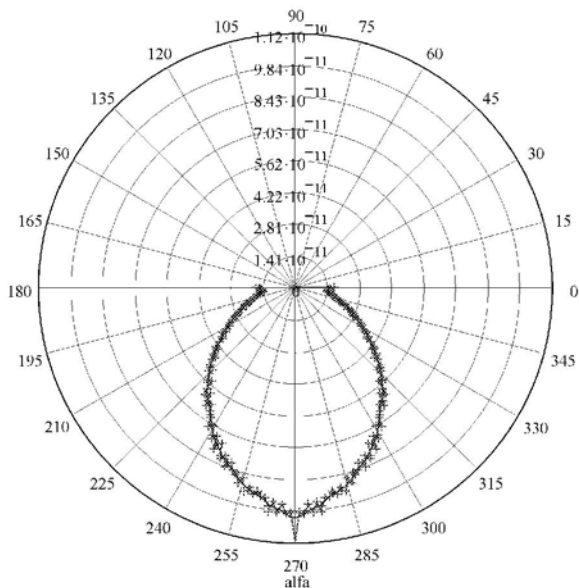


Рис. 5.4 – Диаграмма пространственного распределения амплитуды первого вступления продольных (радиальных) колебаний (смещений узлов) в бетонном образце на расстоянии 10 см от точки возбуждения; (длительность импульса возбуждения 7 мкс, направление воздействия – нормальное к поверхности)

Появлению импульса волны Релея соответствует момент времени около 55 мкс (рис. 5.5, график 2); рис. 5.6, график 1), что дает расчетное значение скорости  $c_R = 1820$  м/сек. При этом, амплитуда первого вступления продольной составляющей волны Релея превышает более чем в 15 раз амплитуду первого вступления продольной волны. Отмеченный факт свидетельствует о возможности селекции волны Релея и продольной волны по их амплитудам. В этом случае, генерация волны производится импульсом нормальным к поверхности, а прием колебаний волны Релея можно производить ЭАП чувствительным как к нормальным, так и тангенциальным составляющим.

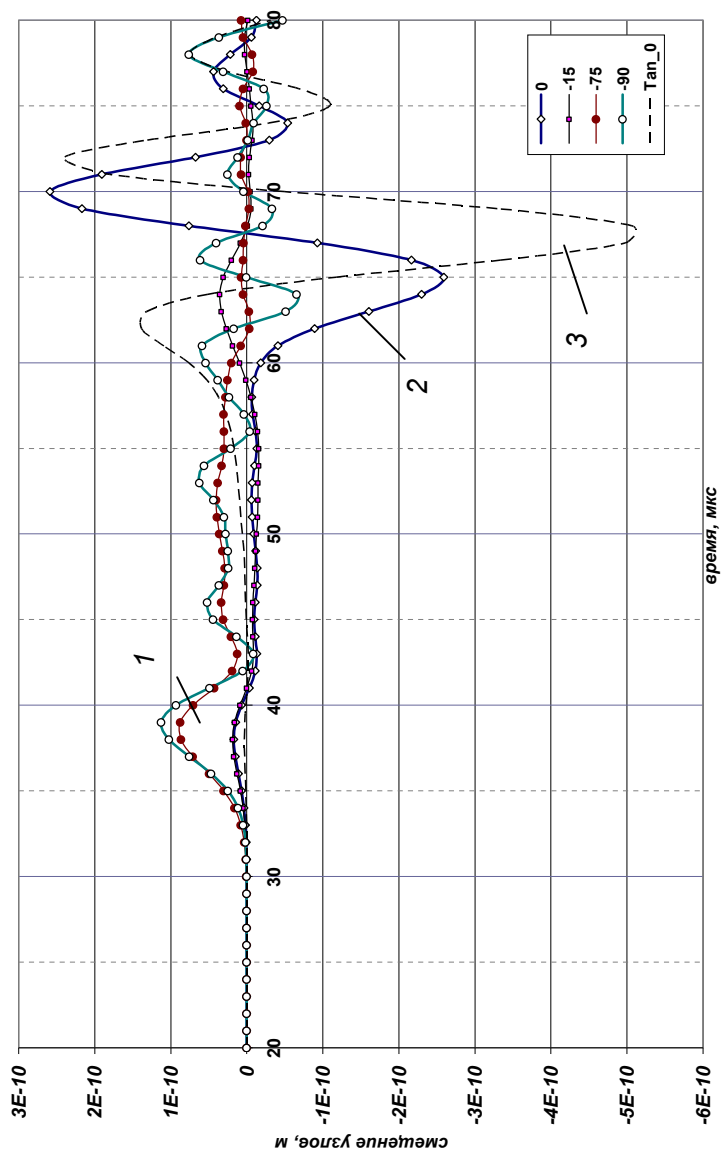


Рис. 5.5 – Временные диаграммы продольных (радиальных) составляющих волнового процесса в бетонном образце для режима точечного нормального возбуждения поверхности поверхности импульсом длительностью 7 мкс, расстояние от точки возбуждения – 10 см

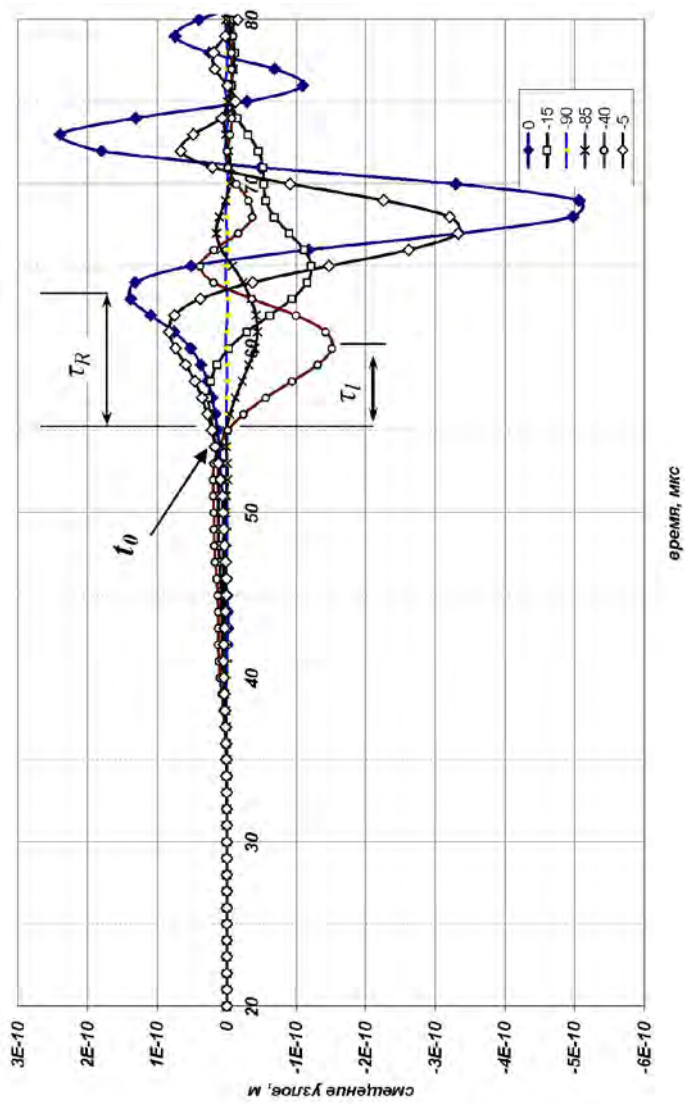


Рис. 5.6 – Временные диаграммы поперечных (тангенциальных) составляющих волнового процесса в бетонном образце для режима точечного нормального возбуждения поверхности импульсом силы длительностью 7 мкс, расстояние от точки возбуждения – 10 см

Поперечная составляющая волнового процесса в образце представлена временными диаграммами на рис. 5.6 и диаграммой направленности на рис. 5.7.

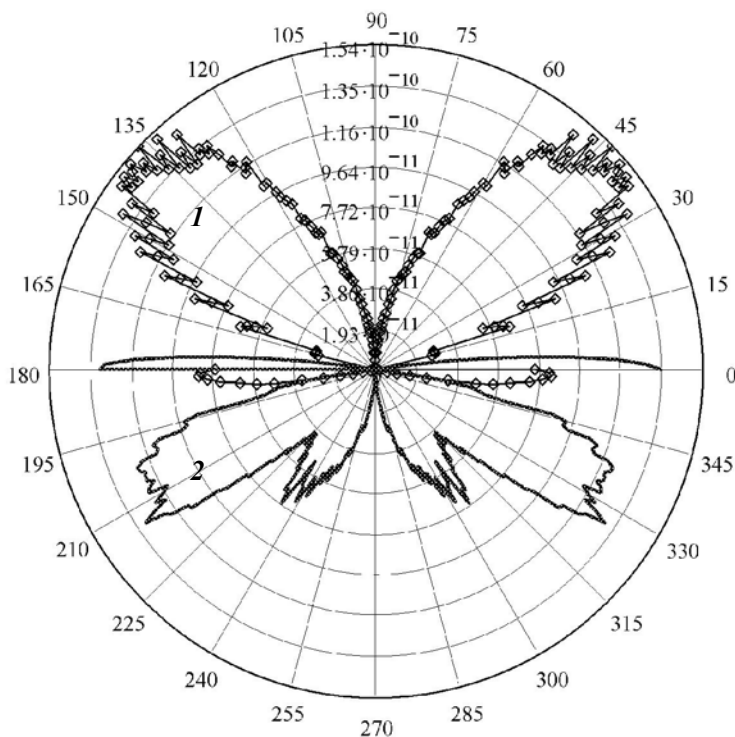


Рис. 5.7 – Диаграмма пространственного распределения амплитуды первого вступления тангенциальных колебаний (деформации) в бетонном образце на расстоянии 10 см от точки возбуждения, при нормальном возбуждении импульсом 7 мкс

Первое вступление этого типа колебаний на поверхности образца обусловлено волной Релея и достигает в амплитуде  $1,4 \cdot 10^{-10}$  м, что превышает уровень первого вступления объемной продольной волны даже в зоне максимума её интенсивности, -  $1 \cdot 10^{-10}$  м.. Присутствие этого импульса, как уже отмечалось в гл. 4, может создать определенные трудности при измерении скорости ультразвуковых колебаний поверхностным методом и методом продольного профилирования (по ГОСТ 17624), при использовании типовых ЭАП с

плоским вязким акустическим контактом. Большая разница в уровнях сигналов продольных и поперечных составляющих акустических волн, в таких случаях, особенно для материалов с большим затуханием, может приводить к значительному занижению оценок скорости УЗК.

Данные моделирования подтвердили узкую зону локализации волны Релея, которая оказалась ограничена тонким поверхностным слоем. На глубине около 1 см амплитуда волны уменьшилась в 1,5 раза, по сравнению с её значением на поверхности; а на глубине 3 см (рис. 5.6, диаграмма -15) – почти в пять раз. Приведенные данные хорошо согласуются с теорией акустики [19, 21, 23, 94] и результатами прямых измерений (см. гл. 7).

Необходимо также отметить (рис. 5.6, график  $0^\circ$ ) значительное «затягивание» фронта первого вступления поперечной составляющей волны, по сравнению с продольными колебаниями. У поперечных длительность фронта  $\tau_R$  почти в 1,5 раза выше. При этом его величина быстро снижается и приближается к  $\tau_l$  по мере «ухода» от поверхности вглубь образца.

Диаграмма направленности поперечных волн (рис. 5.7) показывает присутствие двух лепестков (в каждой полуплоскости), - узкий лепесток, как упоминалось, соответствует процессу распространения волны Релея, - широкий – объемной поперечной волне.

Приведенные выше результаты эксперимента прямого измерения характеристик направленности электроакустических преобразователей дают хорошее совпадение с данными моделирования. Но следует заметить, если для продольных волн наблюдается хорошее совпадение полученных результатов с теорией, то для поперечных волн, расчетные и экспериментальные оценки параметров акустического процесса, совпадая между собой, заметно отличаются от оценок классической теории акустики. В соответствии с теорией [30, 63], пространственная локализация объемной поперечной волны отображается двумя лепестками диаграммы направленности в каждой полуплоскости (рис. 5.8), с выраженным «провалом» между ними под углом  $\sim 30^\circ$  от вертикали.

На диаграммах рис. 5.7 картина выглядит не столь однозначной. Неоднозначность диаграмм связано с вопросом идентификации волновых процессов: если для продольных волн момент времени

достижения сигналом амплитудного значения практически оставался постоянным для всех направлений приема, то для поперечных волн, по данным моделирования, это имело место только в узких секторах приема. Диаграмма 1 (рис. 5.7) (изображена для наглядности зеркально относительно горизонтали) построена для значений акустического сигнала принимаемого в момент времени  $t=t_0+\tau_l$  (рис. 5.6), равный моменту достижения амплитудного значения первой полуволной поперечных колебаний в зоне максимума объемной волны.

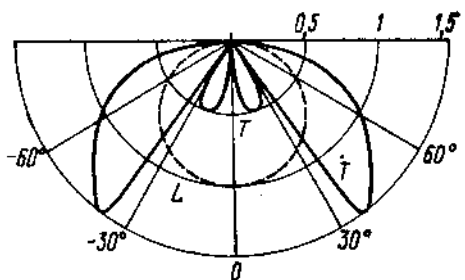


Рис. 5.8 – Теоретические диаграммы направленности точечного источника возбуждения стационарных акустических волн в полубесконечном пространстве [63]:  $L$  – продольных;  $T$  – поперечных

Таким же образом фиксировалась поперечная волна при экспериментальных измерениях. Диаграмма 2, наиболее приближающаяся по форме к «классическому» виду, – для значений того же сигнала, но в момент времени  $t=t_0+\tau_R$  (рис. 5.6). В какой степени эти различия диаграмм обусловлены «грубостью» конечно-элементной модели образца и погрешностями измерений, или проявлением эффекта «ближней зоны» излучателя - предстоит выяснить.

*Анализ данных моделирования волны колебаний возбуждаемой импульсом 1 мкс*

Моделирования волнового процесса с длительностью импульса возбуждения 1 мкс имело задачей, в первую очередь, проверить степень адекватности моделей, выявить частотные (временные) границы её применимости. Практическое же использование волн со столь короткими периодами колебаний (2 мкс) для контроля бетона традиционно считается малоперспективным, главным образом, по



причине сильного затухания волн такой частоты. Создание акустических импульсов такой частоты при достаточной мощности и использовании «сухого» точечного контакта представляет собой весьма непростую задачу, которая на данный момент приемлемого практического решения не получила. Имеются данные об использовании (в лабораторных условиях) с этой целью коротких мощных импульсов лазерного излучения.

Представленные ниже результаты моделирования дают основание взглянуть несколько иначе на целесообразность использования коротких акустических импульсов для контроля бетона.

Пространственные (рис. 5.9) и временные (рис. 5.11) диаграммы для волн, возбуждаемых импульсом длительностью 1 мкс, во многом подобны диаграммам 7 мкс процесса. Заслуживает внимания сохранение скоростей продольной и поверхностной волн на уровне значений определенных для волн 7 мкс процесса.

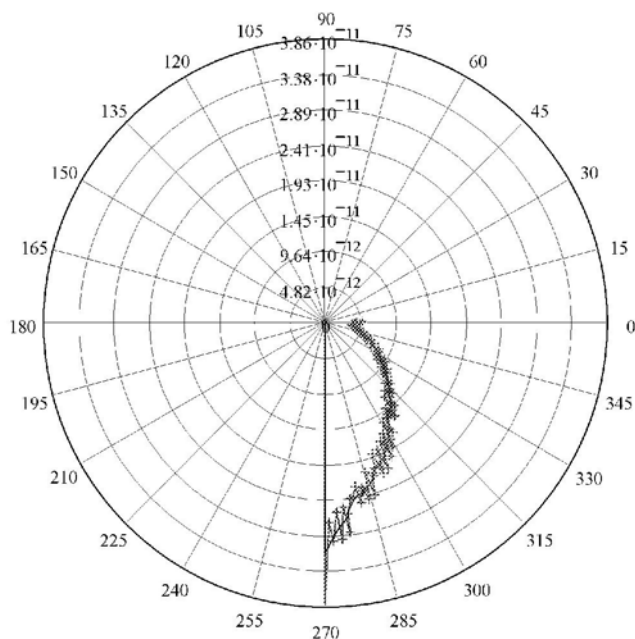


Рис. 5.9 – Диаграмма пространственного распределения амплитуды первого вступления радиальных колебаний в бетонном образце на расстоянии 10 см от точки возбуждения; (длительность импульса возбуждения 1 мкс, направление воздействия – нормальное к поверхности)

В качестве характерного момента, следует отметить возросший уровень «колебательности» волнового процесса, выражающийся в медленном затухании колебаний, как с продольной (рис. 5.11), так и поперечной (рис. 5.12) поляризациями.

Для пространственных диаграмм (рис. 5.9, 5.10) характерна та же форма, что и для возбуждения волны импульса 7 мкс. Следует лишь отметить сильную степень «изрезанности» пространственной диаграммы поперечных колебаний, что является явным признаком недостаточно «мелкого» разбиения модели. Отношение амплитуд продольных составляющих для сквозного и поверхностного сигналов несколько снизилось, и составляет 15,5%.

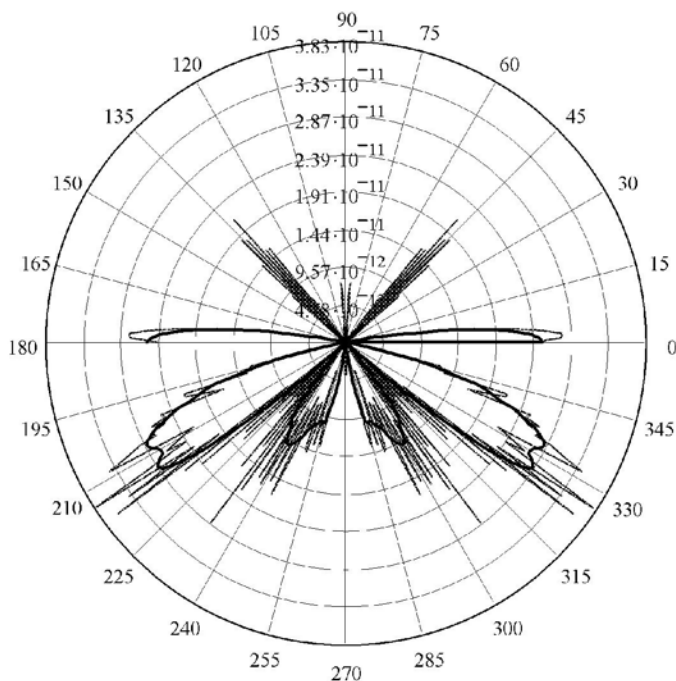


Рис. 5.10 – Диаграмма пространственного распределения первого вступления тангенциальных колебаний (деформации) в бетонном образце на расстоянии 10 см от точки возбуждения, при нормальном возбуждении силовым импульсом 1 мкс

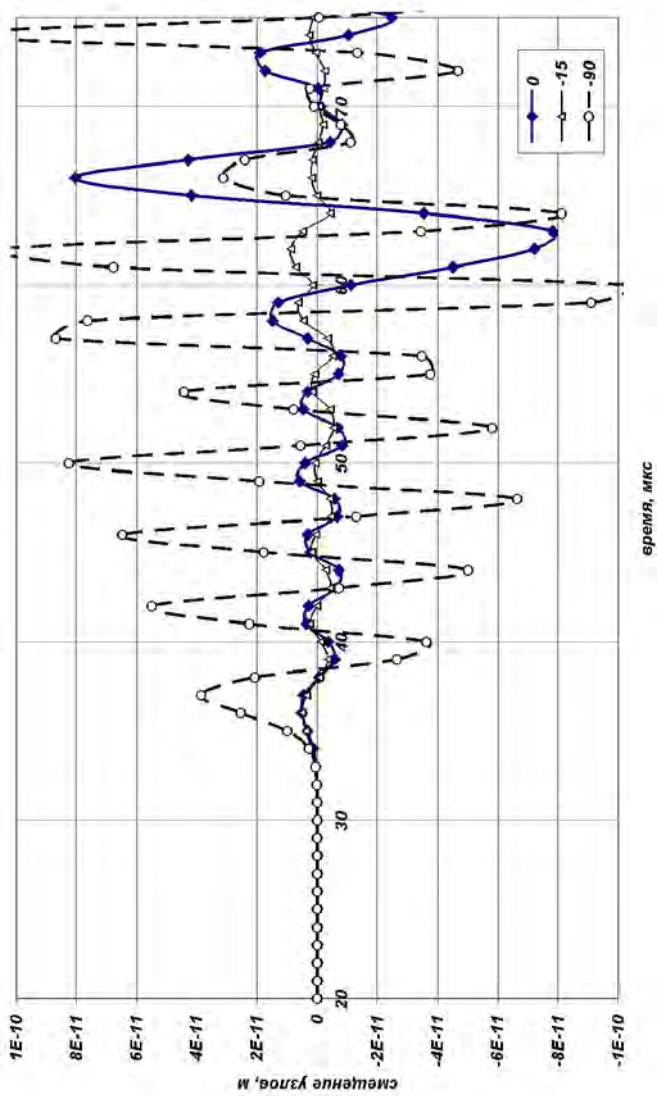


Рис. 5.11 – Временные диаграммы радиальных составляющих волнового процесса в бетонном образце для режима точечного нормального возбуждения поверхности импульсом силой длительностью 1 мкс, расстояние от точки возбуждения – 10 см

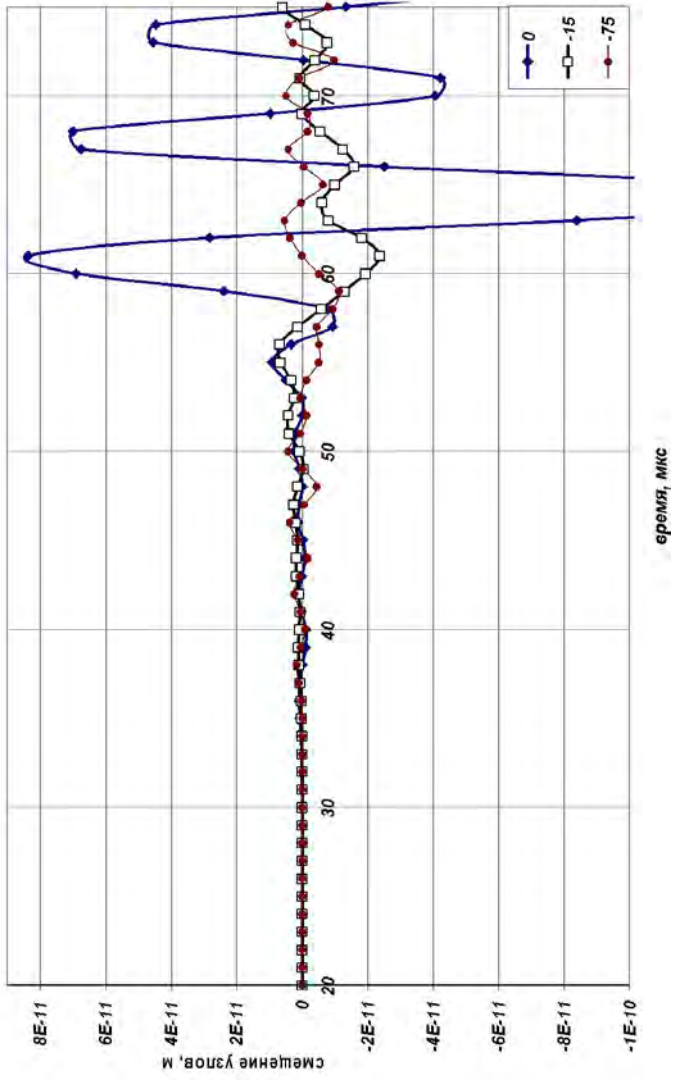


Рис. 5.1.2 – Временные диаграммы тангенциальных составляющих волнового процесса в бетонном образце для режима точечного нормального возбуждения поверхности импульсом силы длительностью 1 мкс, расстояние от точки возбуждения – 10 см

Наибольший интерес, по нашему мнению, представляет факт нарушения пропорциональности между длительностью возбуждающего импульса и периодом колебаний сформированных волн. Длительность первых вступлений колебательных процессов сократились не в 7 раз, как можно было ожидать при снижении в 7 раз длительности импульса возбуждения, а только в 3...3,5 раза. Можно предположить проявление «грубости» использованной конечно-элементной модели, тем более, что в пользу такого предположения может свидетельствовать и сильная неравномерность диаграммы направленности, особенно выраженная для поперечных волн.

### *5.3 Анализ данных моделирования упругих волн возбуждаемых тангенциальным вектором силы*

Выполненный вычислительный эксперимент по моделированию процесса волнообразования тангенциальным возбуждением точки контакта представлен диаграммами на рис. 5.13..5.16.

Режим возбуждения тангенциальных колебаний протектора ЭАП и данные экспериментальных оценок параметров возбуждаемых волн рассмотрены в разделе 4.2.

Тангенциальное возбуждение точки поверхности образца приводит (рис. 5.13, 5.14), в отличие от нормального возбуждения, к образованию интенсивной продольной волны, распространяющейся симметрично относительно точки возбуждения, преимущественно вдоль поверхности образца, в направлении вектора скорости иницирующих колебаний. Это обстоятельство позволяет рекомендовать такой режим возбуждения УЗК для поверхностного прозвучивания бетона при измерениях скорости продольной волны, которая является основным косвенным параметром для оценки прочности бетона по ГОСТ 17624. Значительная амплитуда колебания, практически равная амплитуде колебаний при нормальном (сквозном) прозвучивании, дает возможность отказаться от каких-либо поправочных коэффициентов при оценке скорости волны.

Поперечные составляющие колебаний, являются проявлением, нескольких типов волн. На поверхности образца, в направлении вектора иницирующей силы распространяется поверхностная волна Релея. Амплитуда колебаний узлов на поверхности модели такая

же как и при возбуждении данного типа волны нормальным импульсом силы (рис. 5.5).

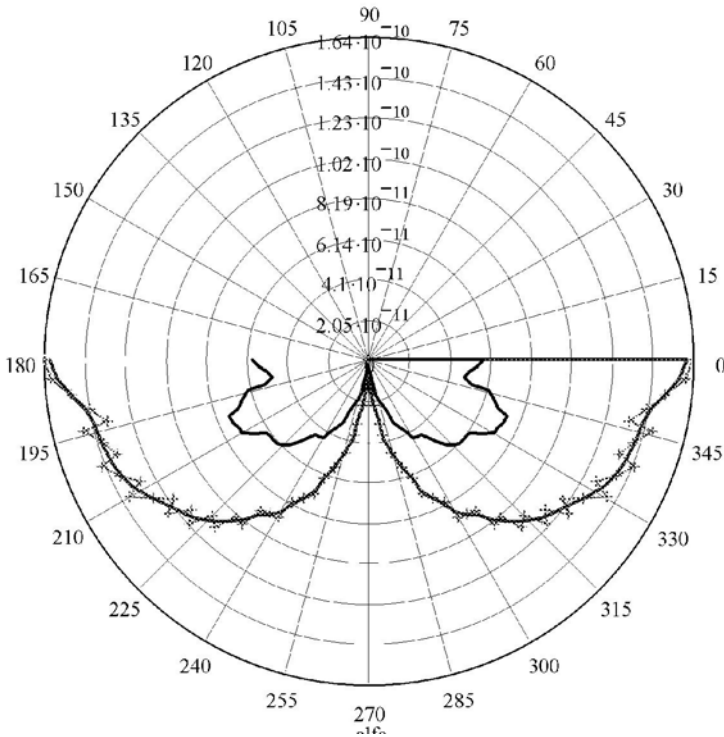


Рис. 5.13 – Диаграмма пространственного распределения амплитуды первого вступления радиальных колебаний (деформации) в бетонном образце на расстоянии 7 см от точки возбуждения; (длительность импульса возбуждения 7 мкс, направление воздействия – касательное к поверхности)

Объемная поперечная волна представлена на рис. 5.16 одним лепестком, максимум которого достигается в плоскости нормальной к вектору силы. Особенностью рассматриваемого режима возбуждения волн является присутствие на поверхности моделируемого образца в направлении перпендикулярном к вектору силы (и направлению распространения волны Релея) так называемых *SH* поперечных волн, вектор колебаний которых лежит в плоскости поверхности образца.

Этот тип волны может быть использован для поверхностного измерения скорости поперечных волн. Для излучения и приема этого типа волны в наибольшей степени подходят ЭАП по схеме рис. 4.6, 4.7.

Измерение скорости поверхностной волны Релея в таком режиме возбуждения выглядит проблематичным, так как, и на радиальные (рис. 5.14) и на поперечные составляющие волны Релея (рис. 5.16) накладываются колебания такого же уровня интенсивности, вызванные продольной волной

Присутствие «мощной» продольной подповерхностной волны приводит к появлению заметной на поверхности модели поперечной составляющей (рис. 5.15, зона TL) колебаний, имеющей такую же скорость распространения, а амплитуду  $\sim 16\%$  от амплитуды продольных колебаний. Именно эта составляющая колебаний определяет принятый ультразвуковой сигнал при поверхностном контроле бетона обычным ЭАП чувствительным к колебаниям параллельным его оси.

Очевидно, что эта составляющая не является проявлением, какого либо иного, от рассмотренных, типов волны, а лишь «сопровождает» на поверхности продольную подповерхностную. Можно предположить непосредственную связь интенсивности этих колебаний со значением коэффициента Пуассона среды.

Полученные данные вычислительного эксперимента позволили уточнить требования к измерительному тракту прибора контроля прочностных характеристик бетона и уточнить алгоритм оценки параметров упругости.

Опорным параметром для оценки прочности бетона является скорость продольной подповерхностной волны  $c_l$ , вспомогательный параметр – скорость поверхностной волны  $c_R$ .

Связь упругих характеристик бетона связана с акустическими параметрами известными соотношениями (табл. 3.1).

Разработанные конструкции акустических преобразователей позволяют выполнить раздельное измерение скоростей продольной и поперечной составляющих упругих волн.

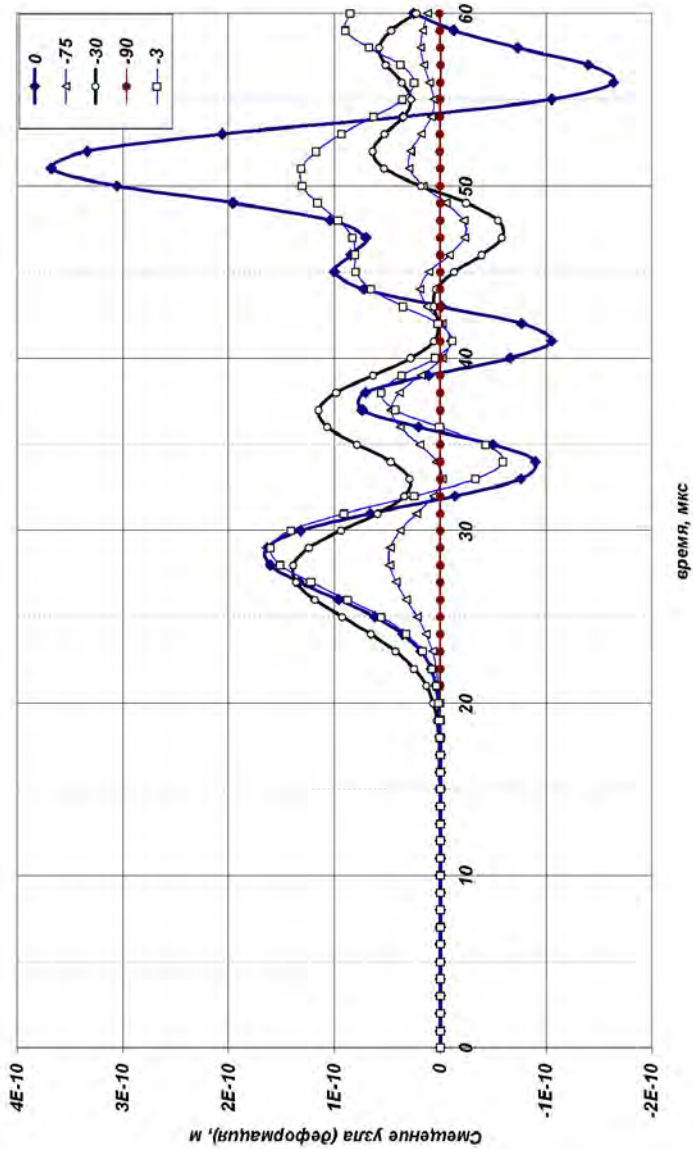


Рис. 5.14 – Временные диаграммы радиальных составляющих волнового процесса в бетонном образце для режима точечного тангенциального возбуждения поверхности импульсом длительностью 7 мкс, расстояние от точки возбуждения – 7 см.



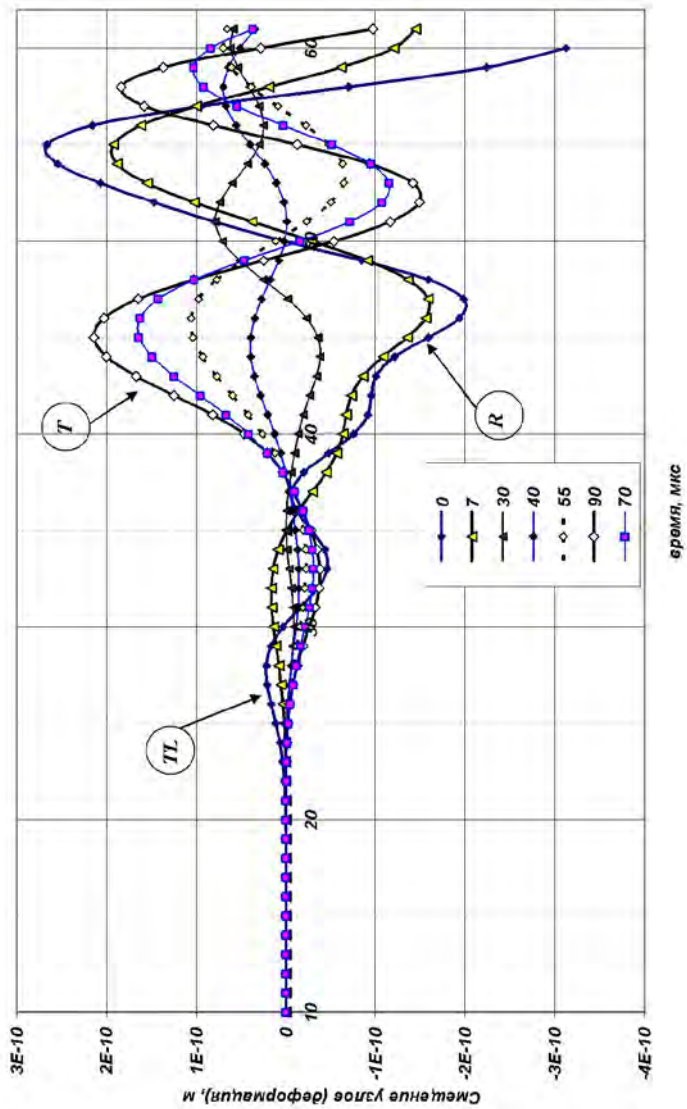


Рис. 5.15 – Временные диаграммы поперечных составляющих волнового процесса в бетонном образце для режима точечного нормального возбуждения поверхности импульсом длительностью 7 мкс

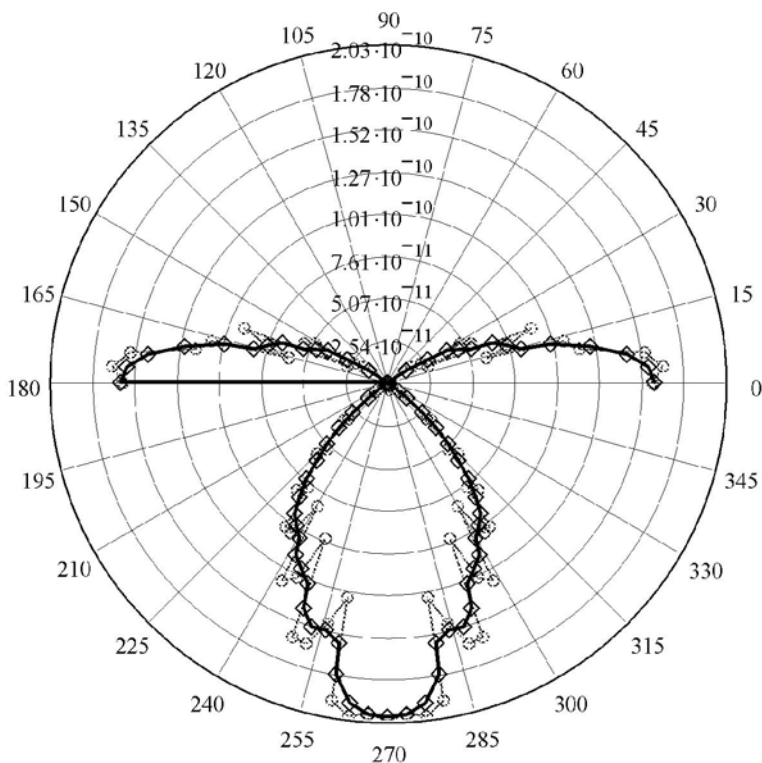


Рис. 5.16 – Диаграмма пространственного распределения амплитуды первого вступления тангенциальных колебаний (деформации) в бетонном образце на расстоянии 7 см от точки возбуждения

Одной из первых задач, решенных с помощью моделирования волнового процесса, которая потребовала решения на стадии проектирования ЭАП с точечным контактом, было оценить энергию (амплитуду) первого вступления принятого сигнала и её соотношение с последующими.

Важным моментом, проявившим себя при моделировании упругой волны, явилась значительная «колебательность» среды распространения волны, что выражалось в медленном затухании колебаний продольных волн после исчезновении вызвавшего их силового импульса. Для поверхностной волны характерна значительно большая – в 2...3 раза амплитуда смещений узлов модели, и в большинстве вариантов моделей затухание этих колебаний в пределах обо-

зреваемого периода не наблюдалось. Это свидетельствует о перераспределении энергии внутри волнового процесса, «перетекании» её к более поздним фазам колебательного процесса. Указанное явление создает препятствия созданию коротких зондирующих импульсов при поверхностного контроля и не может быть радикально ослаблено путем демпфирования излучающего ЭАП.

#### 5.4 Моделирование упругой волны в условиях прохождения поверхностной трещины

Использование конечно-элементного моделирования акустических волн позволило ответить на ряд вопросов, связанных с влиянием на этот процесс поверхностных трещин. Имитация трещины в модели бетонного образца осуществлялась (рис. 5.17) разрывом связей между элементами объемной модели в плоскости перпендикулярной направлению распространения продольной подповерхностной волны. Волна возбуждалась силовым импульсом, представляющим собой один период синусоиды частотой 71 кГц ( $T = 14$  мкс). На рисунке 5.18 приведены временные диаграммы развития упругой волны после прохождения ею трещины расположенной посередине между точками возбуждения и регистрации колебаний:  $x = 50$  мм, база «прозвучивания» – 10 см.

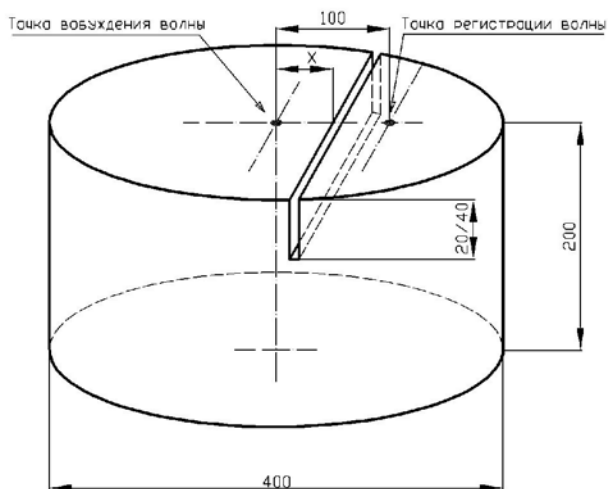


Рис. 5.17 – Имитация трещины в моделируемом бетонном образце

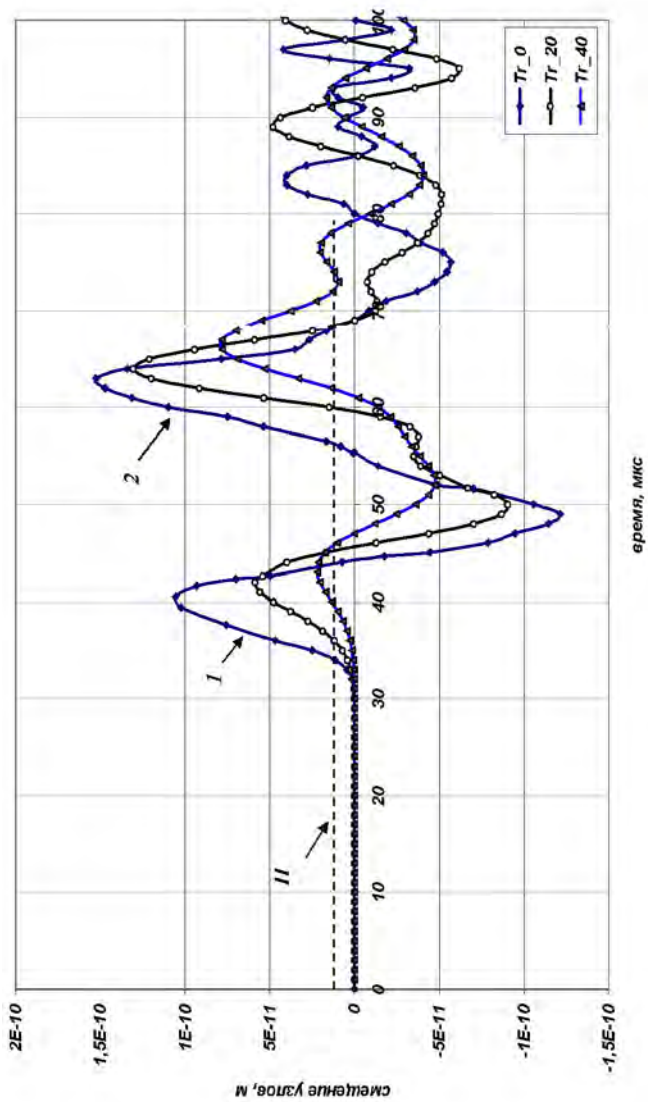


Рис. 5.18 – Временные диаграммы акустического сигнала для поверхностного прозвучивания после прохождения трещины:  
 $Tr_0$  – без трещины;  $Tr_{20}$  – трещина 20 мм;  $Tr_{40}$  – трещина 40 мм; П – порог регистрации акустических колебаний; 1 – первая полуволна колебаний; 2 – второе вступление продольной волны + волна Релея

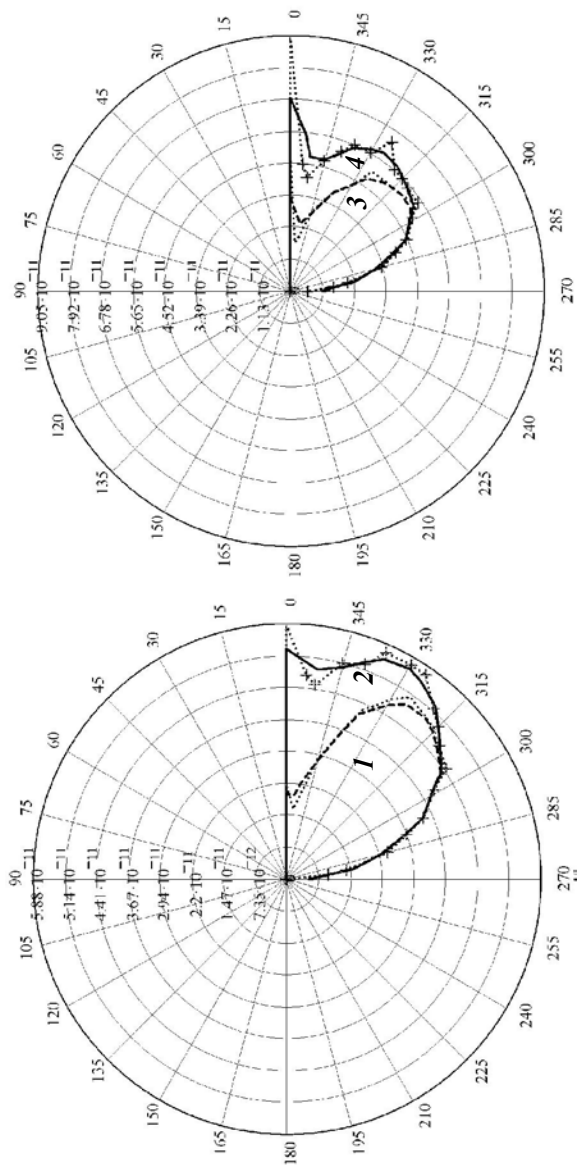


Рис. 5.19 – Диаграммы направленности продольной волны (показана одна полу плоскость): 1, 2 – амплитуды первой полу волны направленных колебаний после прохождения трещины 40 и 20 мм; 3, 4 – амплитуды второй полу волны (возбуждение волн тангенциальным импульсом силы)

Как видно на рис. 5.18, при регистрации положительной полуволны второго вступления акустического сигнала с длительностью импульса возбуждения 7 мкс появляется ошибка, связанная с наложением на сигнал продольной волны сигнала от волны Релея, что видно по характерным искривлениям «синусоиды» сигналов в интервале времени 50...70 мкс, которая при глубине трещины в 40 мм ещё достаточно мощная.

Интересным моментом, с точки зрения выбора оптимального типа зондирующего сигнала, является неожиданно малое затухание составляющих акустического сигнала обусловленных поверхностной волной и вторым вступлением продольной волны, по сравнению с первым вступлением продольной подповерхностной волны. Если в отсутствие трещины, амплитуды второго и первого вступлений относятся как 1,5:1, то присутствие трещины (4 см) изменяет это соотношение до значения 3:1, при этом, временные задержки сигналов, измеренные по амплитудным значениям, совпадают.

Показанный на рис. 5.18 порог регистрации сигнала близок к минимально допустимому по уровню шумов приемного усилителя ультразвукового прибора. Прием сигналов с амплитудой ниже указанного порога будет приводить к ошибкам в оценке времени прохождения импульса на величину близкую к периоду колебаний. Возможности повышения чувствительности приемного тракта прибора с использованием сухого точечного акустического контакта, при приеме первого вступления продольных поверхностных колебаний, ослабленных трещиной, ограничены шумами, уровень которых близок у отмеченному порогу. Потенциальная же возможность увеличения амплитуды зондирующих импульсов, при использовании рассмотренных типов ЭАП, также не велика; - активные пьезо-керамические элементы излучателей работают, как правило, в режимах приближающихся к предельным.

Пути решения задачи повышения достоверности контроля видятся различными. Возможное направление связано с повышением энергетического потенциала акустических колебаний в бетоне, на основе разработки новых типов излучателей ультразвука высокой мощности. В качестве эффективной альтернативы мощным излучателям, может рассматриваться использование «заимствованных» из области акустической дефектоскопии фазированных групп излу-ча-

телей и приемников, и применением зондирующих сигналов с изменяемой поляризацией.

Высокой эффективности при оценке параметров поверхностных трещин следует ожидать от использования в ультразвуковых приборах корреляционных алгоритмов регистрации акустического сигнала (см. гл. 4), «отслеживающих» его характерные участки, производящих сравнение амплитудных значений между собой, их сопоставление с «эталонными» образами сигналов.

Следует отметить, что ни одна из фирм производителей ультразвуковых приборов контроля бетона не дает никакой информации о заложенном измерительном алгоритме, который является фирменным «*know how*».

В таблице 5.1 приведены результаты расчетного моделирования, а на рис. 5.19 приведено пространственное распределение уровня первого вступления УЗ импульса в зависимости от глубины трещины. Диаграмма пространственного распределения амплитуды смещения узлов без трещины представлена на рис. 5.13.

Оценка уровня сигнала производилась по схеме рис. 5.2, для базы прозвучивания 100 мм и расположении поверхностной трещины перпендикулярно поверхности контроля и направлению прозвучивания. В первом приближении картина экранирования волны трещиной соответствует геометрической модели, это относится, главным образом, к фронту продольной волны.

На рис. 5.20 приведена зависимость затухания указанных типов волн для поверхностной зоны контроля в зависимости от глубины трещины. Характер затухания первого вступления продольной подповерхностной волны практически линейно зависит от глубины трещины. И для глубины трещины в 40 мм амплитуда этого сигнала снижается в 5 раз.

В меньшей степени затухают последующие составляющие волнового процесса. Разница в степени затухания составляющих зондирующего импульса может использоваться в качестве дополнительного информационного параметра для обнаружения и оценки поверхностных трещин в бетоне. Наибольший эффект такого «амплитудного» метода обнаружения трещин должен проявляться при малых значениях её глубины, где временной метод обладает низкой чувствительностью. Реализация метода, как указывалось выше, по-

требует заметного усложнения измерительного алгоритма прибора контроля.

Таблица 5.1 – Амплитуды акустического сигнала, прошедшего через трещину (полученные методом компьютерного моделирования)

№ п/п	Alfa, град.	Глубина трещины, мм			
		20		40	
		Ампл.1вст., м	Ампл.2п/в, м	Ампл.1вст., м	Ампл.2п/в, м
1	2	3	4	5	6
1	90	5,88E-11	-9,00E-11	2,20E-11	-4,72E-11
2	84,3	4,73E-11	-4,50E-11	1,63E-11	-1,73E-11
3	81,5	4,55E-11	-3,90E-11	1,87E-11	-1,92E-11
4	75,3	5,15E-11	-4,80E-11	2,88E-11	-2,88E-11
5	69,8	5,29E-11	-5,30E-11	3,58E-11	-3,41E-11
6	66	5,73E-11	-5,70E-11	4,27E-11	-3,82E-11
7	59,5	5,73E-11	-5,70E-11	4,83E-11	-4,32E-11
8	55,5	5,73E-11	-5,90E-11	5,11E-11	-4,74E-11
9	49,1	5,20E-11	-5,70E-11	4,96E-11	-4,87E-11
10	45	5,00E-11	-5,70E-11	4,87E-11	-5,05E-11
11	40,9	4,71E-11	-5,60E-11	4,65E-11	-5,23E-11
12	34,5	4,51E-11	-5,50E-11	4,48E-11	-5,48E-11
13	31	4,00E-11	-5,10E-11	3,99E-11	-5,08E-11
14	24	3,48E-11	-4,60E-11	3,48E-11	-4,61E-11
15	20,2	2,98E-11	-4,00E-11	2,98E-11	-4,08E-11
16	14,7	2,43E-11	-3,40E-11	2,43E-11	-3,42E-11
17	8,5	1,42E-11	-2,10E-11	1,42E-11	-2,12E-11
18	5,7	9,76E-12	-1,50E-11	9,76E-12	-1,49E-11
19	0	1,71E-13	-6,20E-12	1,71E-13	-7,71E-12

Ниже рассмотрено влияние на характер акустического сигнала смещения трещины к излучателю. На рис. 5.21 приведены пространственные диаграммы продольных упругих волн, для случая для  $x = 25$  мм (рис. 5.17).

Сопоставляя приведенные диаграммы можно констатировать, что при глубине трещины превышающей её расстояние до точки возбуждения волны амплитуда сигнала от нормально направленного импульса возбуждения превосходит амплитуду сигнала возбуждаемого тангенциальным импульсом. Это подтверждает приведенное выше предположение об эффективности смены поляризации



зондирующего акустического сигнала для обнаружения и оценки глубоких трещин.

Проведенные работы по моделированию «работы» трещины в акустическом поле показывают целесообразность создания специализированных приборов или приставок к уже существующим с малым значением базы прозвучивания – на уровне нескольких сантиметров и возможностью переключения вектора поляризации волны, что повысит достоверность обнаружения трещин и точность оценки их глубины.

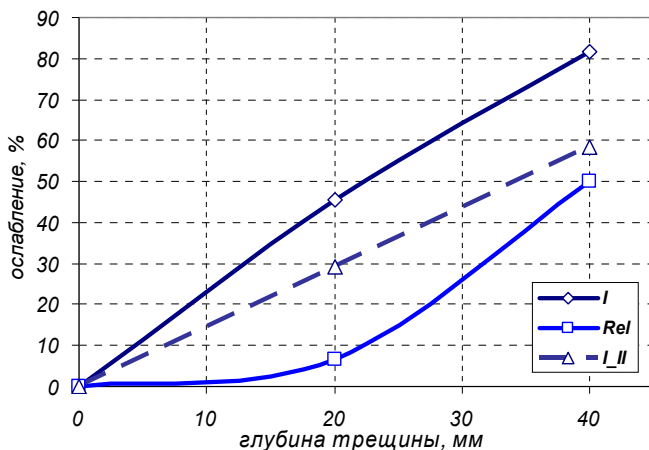


Рис. 5.20 – Зависимость затухания акустических волн в от глубины трещины и типа волны: I – продольная поверхностная; Rel – волна Релея + 2-е вступление продольной волны; I-II – вторая полуволна первого вступления акустического сигнала

Приведенные в публикациях [23, 24, 85] данные по моделированию «работы» трещины в акустическом поле показывают целесообразность создания специализированных приборов или приставок к уже существующим с малым значением базы прозвучивания – на уровне нескольких сантиметров и возможностью переключения вектора поляризации волны, что повысит достоверность обнаружения трещин и точность оценки их глубины.

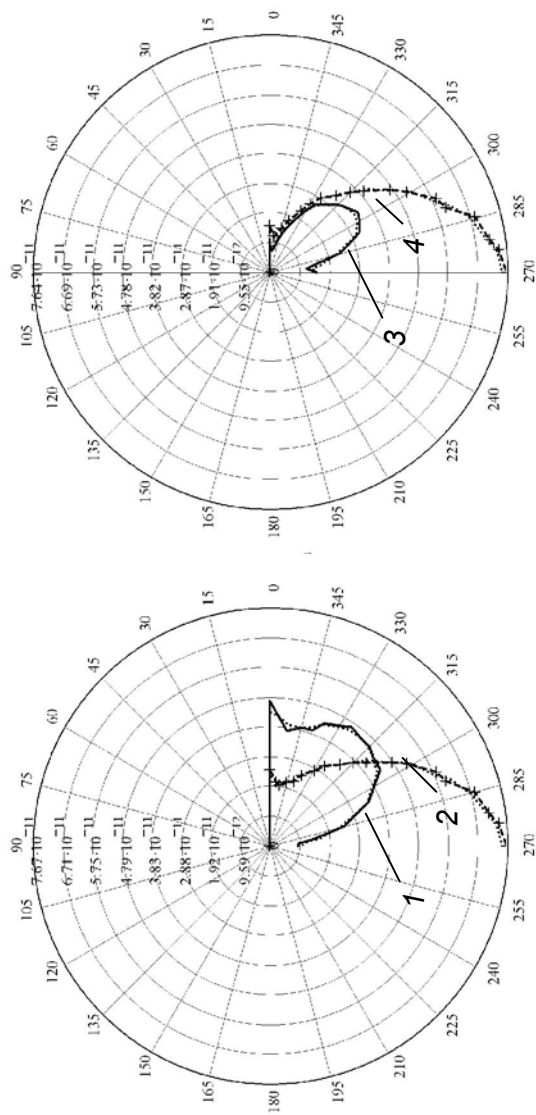


Рис. 5.21 – Диаграммы направленности продольной волны (амплитуды первой полуволны) для базы измерения 100 мм, длительности импульса возбуждения – 14 мкс (частота 71 кГц), глубина трещины составляет для диаграммы слева – 20 мм, справа – 40 мм. 20 мм : 1, 3 – возбуждение волны тангенциальным импульсом силы ; 2, 4 – нормальным к поверхности

Кроме рассмотренной выше картины влияния трещины на энергетические показатели ультразвукового импульса, представляет интерес картина направленности распространяющегося импульса, и степень ее адекватности геометрической модели (рис. 5.22) распространения ультразвукового (УЗ) импульса.

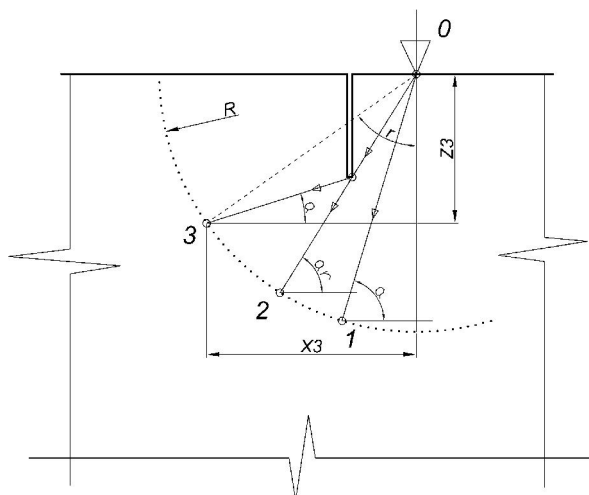


Рис. 5.22 – Геометрическая модель треков распространения ультразвукового импульса в зоне поверхностной трещины  
 $0$  – точка ввода ультразвукового импульса;  $1, 2, 3$  – точки регистрации смещения узлов КЭ модели;  $\alpha$  – угол «перелома» трека распространения УЗ импульса

На рис. 5.23 приведены зависимости углов векторов колебаний (смещений) – кривые 3,4 – по данным расчетной КЭ модели бетонного образца, и расчетные значения углов треков распространения УЗ импульса – кривые 1,2, исходя из геометрической модели.

Рассматриваемая модель имеет следующие размеры:

- расстояние трещины от точки ввода УЗ импульса – 25 мм;
- глубина трещины – 40 мм;
- расстояние от точки ввода  $0$  до точек регистрации УЗ импульса – 100 мм;
- вектор возбуждения УЗ импульса нормальный к поверхности (длительность – 7 мкс).

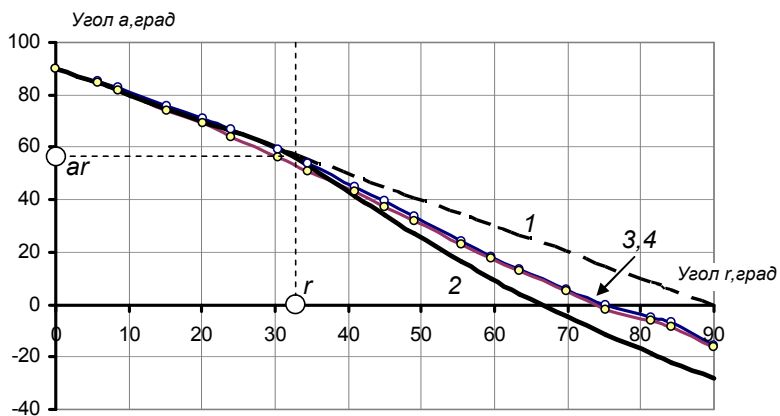


Рис. 5.23 – Расчетные зависимости углов векторов колебаний (смещений) узлов КЭ модели образца с трещиной:  $r$ ,  $ar$  – углы «перелома» трека УЗ импульса:  
 1 - исходя из геометрической модели трещины; 2 – при отсутствии трещины;  
 3, 4 – по данным расчетной КЭ модели бетонного образца

Для принятых характеристических размеров модели углы «перелома» трека соответственно равны:  $ar = 58^\circ$ ;  $r = 32^\circ$ .

Вне области акустической тени трещины ( $90^\circ > a > ar$ ) данные КЭ моделирования и геометрической модели практически совпадают. В области акустической тени (точка 3 – рис. 5.22) значения угла  $a$  по данным КЭ и геометрической модели заметно различаются. Из условия перпендикулярности волнового фронта направлению его распространения можно определить условный центр области переизлучения, который оказался на противоположной стороне трещины. Данное обстоятельство не согласуется с геометрическими моделями переизлучения УЗ импульса вершиной трещины. Для уточнения картины в дальнейшем потребуется проверка параметров области переизлучения УЗ импульса при других начальных условиях, например, для другой геометрии и размеров испытательной модели трещины. Возможно, эффективным окажется прием уменьшения длины волны импульса. В этом случае следует ожидать сближения центра области переизлучения УЗ импульса с вершиной трещины.

Таким образом, по данным КЭ моделирования процесса распространения УЗ импульса в зоне поверхностной трещины установлено, что область переизлучения УЗ импульса поверхностной трещи-

ной имеет в плоскости треков распространения форму близкую сегменту круга (рис. 5.24) с центром, расположенным на треке, проходящем через вершину трещины. Виртуальный центр  $O^*$  области переизлучения локализуется не в вершине трещины, как следует из геометрических представлений, а отстоит от нее примерно на  $\frac{1}{2}\lambda$  в направлении к поверхности образца.

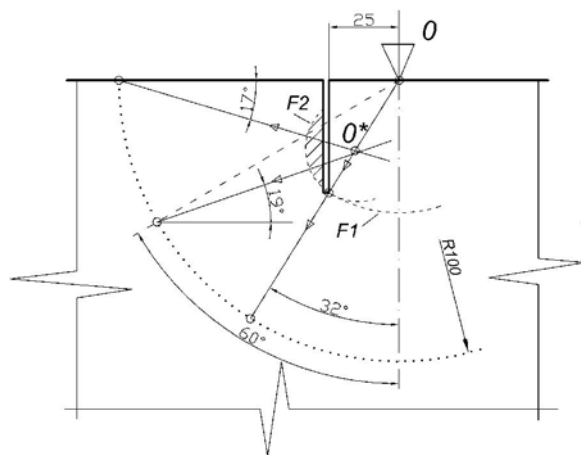


Рис. 5.24 – Схема расположения области переизлучения УЗ импульса трещиной:  
 $O$  – точка ввода ультразвукового импульса;  $O^*$  – виртуальный центр области переизлучения УЗ импульса;  $F1$  – фронт прямой УЗ волны;  $F2$  – фронт переизлученной УЗ волны

Диаграмма направленности УЗ колебаний области переизлучения приведена на рис. 5.25. Как и предполагалось, максимум интенсивности излучения зоной переизлучения соответствует углу перелома трека излучения. В рассматриваемой схеме (рис. 5.24) угол перелома равен  $32^\circ$ . На рис. 5.25 этому углу соответствует значение  $238^\circ$ , являющееся дополнением угла  $32^\circ$  до  $270^\circ$ .

По мере приближения точки регистрации УЗ импульса (по радиусу  $R=100$  мм) к поверхности образца, интенсивность колебаний монотонно уменьшается от значения  $1,42 \cdot 10^{-11}$  м до  $3,62 \cdot 10^{-13}$ , то есть приблизительно – в 50 раз. В зоне распространения прямой волны – угол в пределах  $238^\circ - 270^\circ$  - диаграмме направленности будет соответствовать фрагмент диаграммы (рис. 5.13), в пределах угла  $302^\circ - 270^\circ$ .

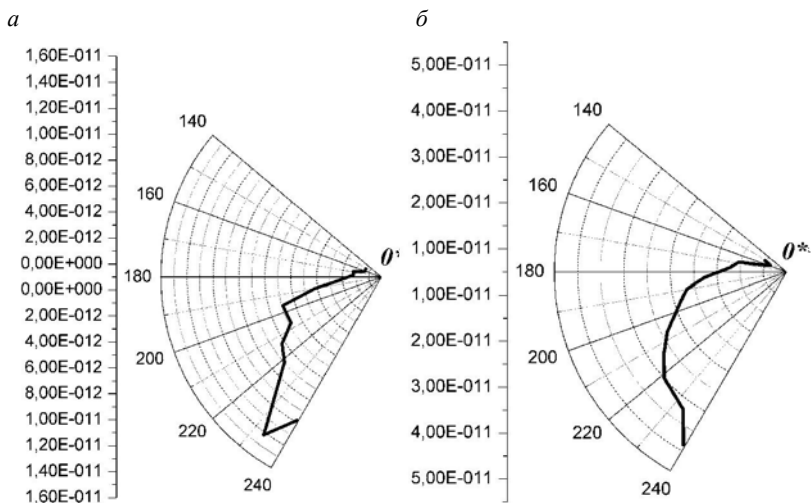


Рис. 5.25 – Диаграммы направленности излучения продольной волны ультразвуковых колебаний областью переизлучения УЗ импульса трещиной:  
*a* – для момента времени 34 мкс после инициации импульса;  
*б* – для момента 41 мкс

По мере приближения точки регистрации УЗ импульса (по радиусу  $R=100$  мм) к поверхности образца, интенсивность колебаний монотонно уменьшается от значения  $1,42 \cdot 10^{-11}$  м до  $3,62 \cdot 10^{-13}$ , то есть приблизительно – в 50 раз. В зоне распространения прямой волны – угол в пределах  $238^\circ - 270^\circ$  - диаграмме направленности будет соответствовать фрагмент диаграммы рис. 5.13, в пределах угла  $302^\circ - 270^\circ$ .

### 5.5 Моделирования распространения волны акустического импульса в бетонном массиве с армированием

Для уточнения картины распространения ультразвукового импульса вдоль оси стержня стальной арматуры, находящегося в бетонном монолите, исследовался виртуальный образец – конечно-элементная осесимметричная модель, представляющая собой цилиндр длиной 400 мм и диаметром 300 мм (рис. 5.26).

Ось стального стержня совпадает с осью цилиндра. Ультразвуковой импульс инициируется силовым воздействием длительно-

стью 7 мкс и амплитудой 1 Н, в соответствии с (5.2). Принятые характеристики материала стержня:  $E1 = 260 \text{ ГПа}$ ;  $\nu1 = 0,3$ ;  $\rho1 = 7800 \text{ кг/м}^3$ , что соответствует «стержневой» скорости УЗК  $c_0 = 5774 \text{ м/с}$  и скорости объемной продольной волны  $c_l = 6699 \text{ м/с}$ . Плотность бетонного цилиндра  $\rho2 = 2400 \text{ кг/м}^3$ .

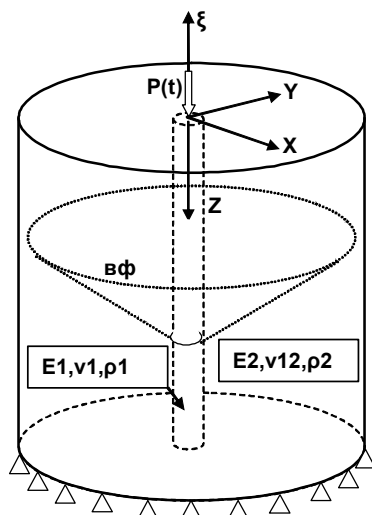


Рис. 5.26 – Моделируемый бетонный образец с армированием

Предварительно была выполнена оценка коэффициента ослабления импульса продольной волны по мере ее распространения вдоль оси цилиндра при отсутствии армирования.

Теоретически [21, 94] амплитуда деформации (смещение узлов модели)  $\xi$  должна уменьшаться прямо пропорционально пройденному волной расстоянию  $Z$  в соответствии с выражением:

$$\xi = \xi_0 \cdot \frac{Z_0}{Z}, \quad (5.4)$$

где  $Z_0$  и  $\xi_0$  - соответственно опорные координата и амплитуда деформации.

На рис. 5.27 приведены временные диаграммы нормированных значений упругих деформаций образца в точках, расположенных на его оси по направлению распространения волны.

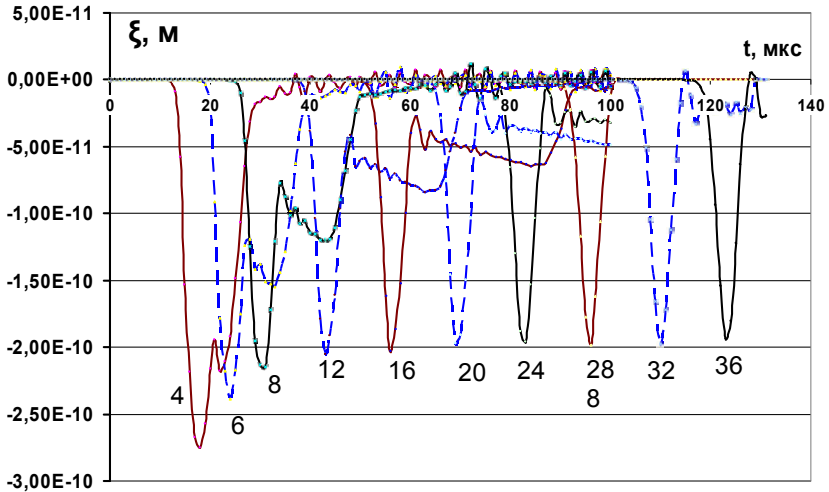


Рис. 5.27 – Временные диаграммы волнового импульса для однородной модели,  $E_2 = 20$  ГПа

Цифры у вершин импульсов соответствуют координате  $Z$ . Параметры материала модели:  $E_2 = 20$  ГПа;  $\nu_2 = 0,2$ ;  $\rho_2 = 2400$  кг/м<sup>3</sup>. Нормирование выполнялось в соответствии с выражением:

$$\xi_{Norm} = \xi \cdot Z / Z_0, \quad (5.5)$$

где  $\xi_{Norm}$  – нормированная амплитуда импульса,  $\xi$  – фактическая амплитуда,  $Z_0$  принято равным 4 см.

Для однородной модели амплитуды волн и форма импульса (передний фронт) для  $Z \geq 8$  см сохраняются неизменными, что подтверждает адекватность КЭ модели. Некоторый рост амплитуды волнового импульса для  $Z < 8$  см связан с влиянием границы (торцевой плоскости) модели.

Фактическое значение скорости продольной волны в образце, определенное по формуле  $C_i^* = \Delta Z / \Delta t$ , составило 3119 м/с; расчетное, по формуле – 3045 м/с.

Присутствие стального стержня приводит к значительному изменению характера распространения волнового импульса. Поскольку скорость импульса в стержне практически в полтора раза превосходит скорость импульса в массиве, то волновой фронт будет



представлять собой конус,двигающийся вдоль оси  $Z$  со скоростью около 5800 м/с (рис. 5.26).

На рис. 5.28 и 5.29 показаны «снимки» фронта импульсов деформации в армированном бетонном образце в разные моменты времени, по данным КЭ моделирования. Диаметр стержня – 8 мм.

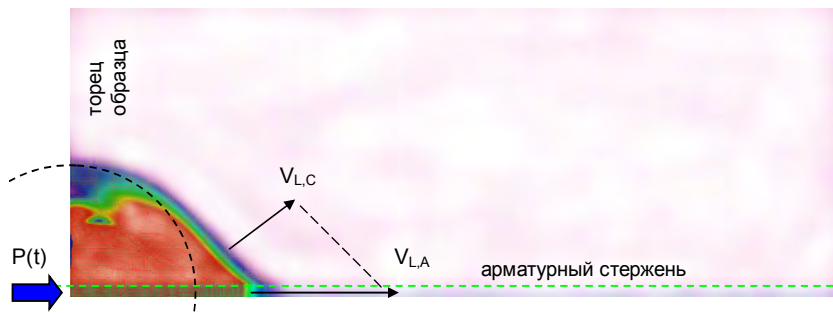


Рис. 5.28 – Смещения узлов КЭ модели армированного бетонного образца в момент времени 17 мкс после инициирующего импульса:  $V_{L,C}$ ,  $V_{P,A}$  – вектора скорости распространения фронтов импульсов продольных волн в бетоне и арматурном стержне

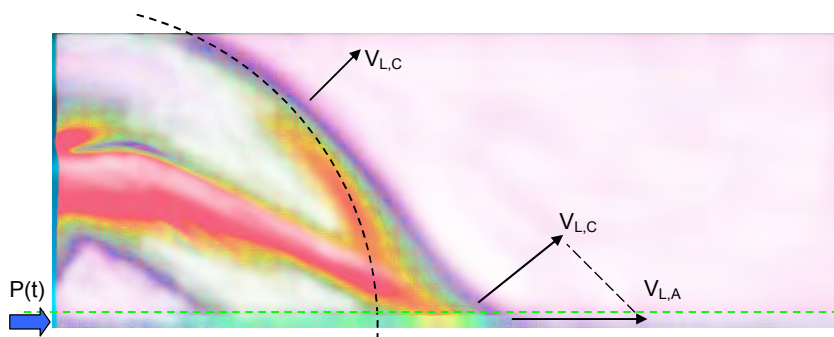


Рис. 5.29 – Смещения узлов КЭ модели армированного бетонного образца в момент времени 49 мкс после инициирующего импульса

Штриховой линией обозначено расчетное положение сферического фронта импульса деформации в образце без армирования.

Поскольку вершина конуса имеет малый радиус кривизны, то в этой зоне фронта происходит быстрое снижение интенсивности колебаний за счет передачи энергии волны в стержне волне уходящей в массив образца. На рис. 5.30 показано положение фронтов им-

пульсов в момент времени, когда происходит ослабление «лидирующего» фронта в арматуре, и передача колебательной энергии волне в бетонном массиве. На рис. 5.31 присутствуют только сферические фронты в бетонном массиве.

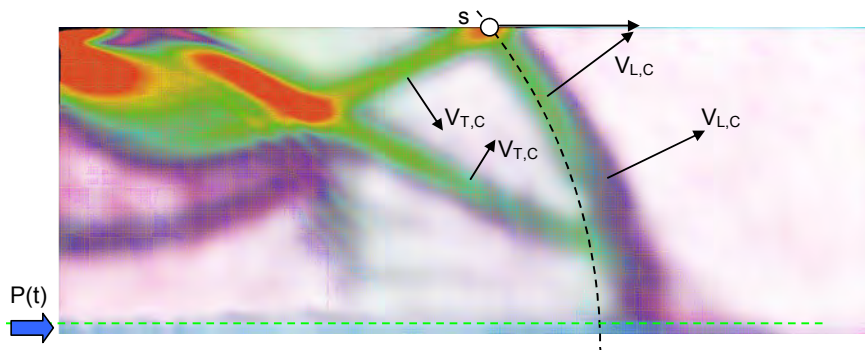


Рис. 5.30 – Смещения узлов КЭ модели армированного бетонного образца в момент времени 62 мкс после инициирующего импульса:  $V_{L,C}$ ,  $V_{T,C}$  – вектора скорости фронтов импульсов продольной и поперечной волн

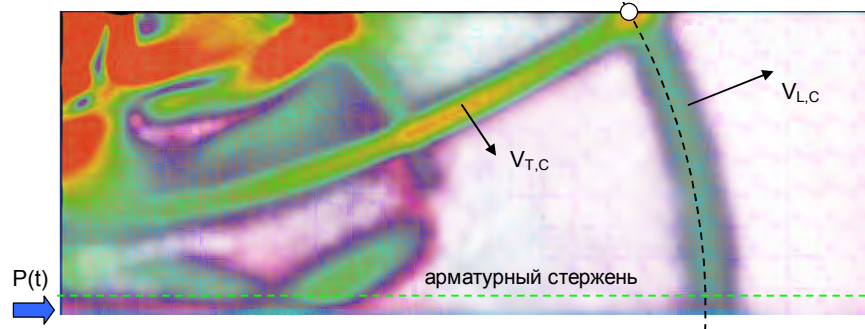


Рис. 5.31 – Смещения узлов КЭ модели армированного бетонного образца в момент времени 77 мкс после инициирующего импульса

В точке  $s$  поверхности образца-модели происходит отражение и трансформация импульса продольной волны в импульс поперечной волны с вектором скорости распространения фронта  $V_{T,C}$ .

На рис. 5.32 и 5.33 приведены временные диаграммы нормированных значений упругих деформаций вдоль оси  $Z$  (рис. 5.26) армированного образца с указанными выше характеристиками материала массива и диаметром стержня  $d = 8$  мм.

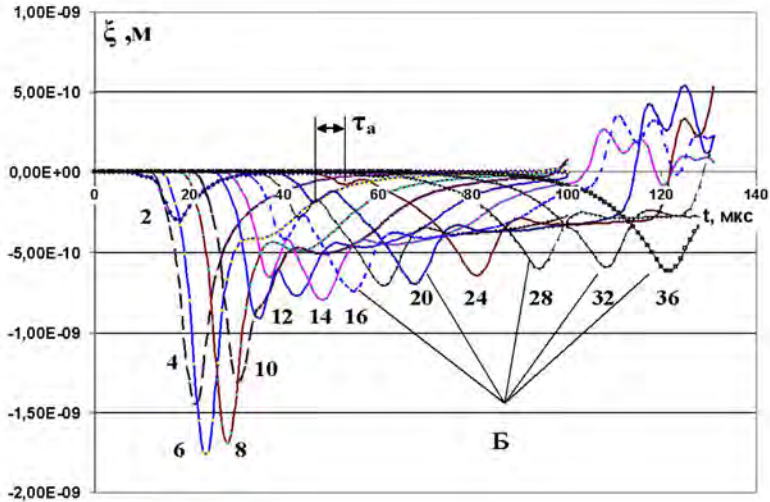


Рис. 5.32 – Временные диаграммы смещения узлов оси арматурного стержня КЭ модели армированного бетонного образца

Цифры у вершин диаграмм соответствуют расстоянию в сантиметрах от точки регистрации импульса до активного торца образца-модели. Нормирование амплитуд импульсов на рисунке 5.32 выполнялось в соответствии с (5.5).

В армированном образце, в отличие от однородного (рис. 5.27), наблюдается изменение формы импульса и его «расползание» (увеличение длительности) по мере распространения, что является следствием дисперсии скорости ультразвука в неоднородной среде – тонком стержне в бетонном массиве. Каждая диаграмма двугорбая. Первый амплитудный выброс, как и можно было ожидать, соответствует импульсу пришедшему в точку регистрации со скоростью распространения в стали. Второй импульс, пришедший с некоторой задержкой, наведен фронтом волны распространяющейся в окружающем арматуру бетоне. В начальной стадии распространения первого импульса волны по стержню ( $Z < 8$  см) его амплитуда затухает медленнее, чем в массиве без армирования, - проявляется волноводный эффект. Дальнейшее распространение импульса происходит с возрастающим затуханием, характер затухания экспоненциальный. Затухание второго импульса каждой диаграммы значи-

тельно ниже, - по отношению к амплитуде первого импульса амплитуда второго возрастает с ростом расстояния от точки возбуждения (рис. 5.33 и рис. Б.3).

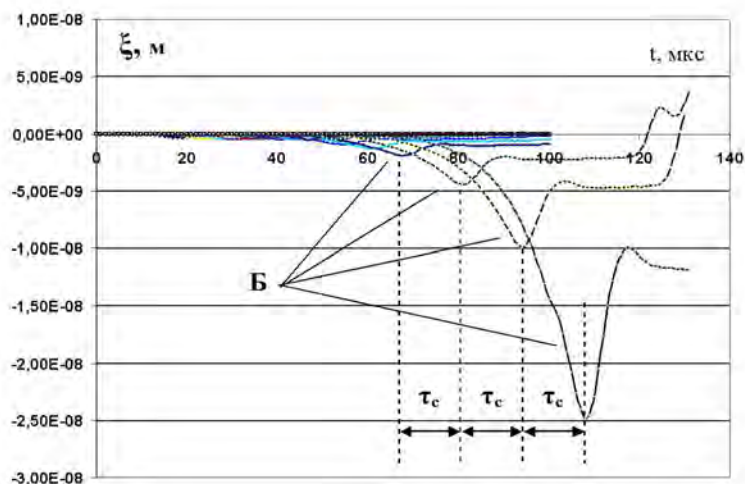


Рис. 5.33 – Временные диаграммы смещения узлов оси арматурного стержня КЭ модели армированного бетонного образца

На рис. 5.33 и рис. Б.3 нормирующий масштабный коэффициент  $K_{Norm,i}$  для каждой диаграммы подбирался индивидуально таким образом, чтобы выровнять амплитуды первых импульсов. Полученные значения нормирующих коэффициентов приведены в прил. табл. Б.1.

Длительность временного интервала  $\tau_a$  составляет около 6,7 мкс, что соответствует скорости распространения импульса 5910 м/с, которая ниже скорости объемной волны в стали ( $c_l = 6699$  м/с), но больше «стержневой» скорости ( $c_0 = 5774$  м/с). На этой стадии начинает проявляться составляющая фронта импульса – Б, обусловленная волновым процессом в ближней к арматурному стержню зоне бетона. Амплитуда этой составляющей фактически удовлетворяет условию (5.5). Оценка скорости распространения этой составляющей волны дает значения близкие к скорости продольной волны в массиве бетона:  $\tau_c = 13$  мкс;  $V_l = 0,04 / (13 \cdot 10^{-6}) = 3077$  м/с.

Это обстоятельство указывает на возможность определения скорости ультразвукового импульса в бетоне по формуле (6.5), проводя

измерения дифференциальной скорости распространения импульса в зоне расположения стержня арматуры вплоть до измерений на самом стержне. Для стержня диаметром 8 мм база прозвучивания должна быть не менее 20 см, для стержня диаметром 16 мм – более 32...36 см. Такая методика позволит обойти ряд ограничений связанных с армированием при ультразвуковом контроле железобетонных конструкций. Рассматриваемая модель процесса распространения ультразвукового импульса представляет собой предельный случай, когда импульс возбуждается в самом стержне арматуры. Можно предположить, что возбуждение импульса в точке расположенной в бетоне на некотором расстоянии от стержня приведет к уменьшению минимального значения базы прозвучивания, позволяющей осуществить селекцию информационной составляющей импульса. Реализация данной методики сталкивается с задачей создания ЭАП с малым временем реверберации, позволяющих формировать и принимать одиночные ультразвуковые импульсы.

На рис. 5.34 приведены зависимости коэффициента нормирования (затухания) от относительного расстояния распространения.

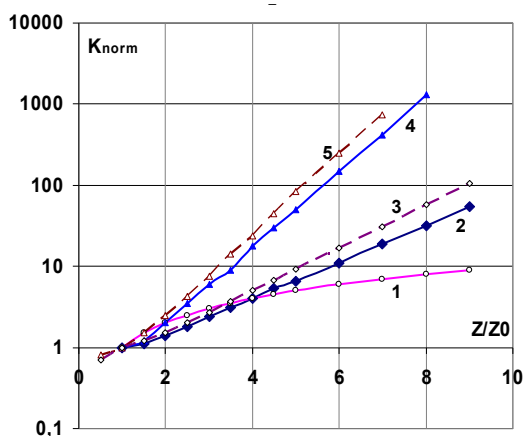


Рис. 5.34 – Зависимость коэффициента затухания ультразвукового импульса в армированном образце бетона:

1 – без армирования; 2 –  $d = 16$  мм,  $E_{cm} = 20$  ГПа; 3 –  $d = 16$  мм,  $E_{cm} = 40$  ГПа;  
4 –  $d = 8$  мм,  $E_{cm} = 20$  ГПа; 5 –  $d = 8$  мм,  $E_{cm} = 40$  ГПа;  $Z_0 = 4$  см

Масштаб графиков по вертикали логарифмический. Увеличение модуля упругости массива бетона приводит к увеличению затухания. Влияние коэффициента Пуассона бетона (в интервале значений 0,18...0,25) на коэффициент затухания импульса не обнаружено. Аналитические выражения для расчета коэффициента затухания ультразвукового импульса в зоне стержня арматуры имеют вид:

для  $E = 20$  ГПа,  $d = 8$  мм

$$\frac{\xi}{\xi_0} = 1,72 \cdot e^{-0,272 \frac{Z_0}{Z}}, \quad (5.6)$$

$d = 16$  мм

$$\frac{\xi}{\xi_0} = 2,78 \cdot e^{-1,05 \frac{Z_0}{Z}}, \quad (5.7)$$

для  $E = 40$  ГПа,  $d = 8$  мм

$$\frac{\xi}{\xi_0} = 1,92 \cdot e^{-0,513 \frac{Z_0}{Z}}, \quad (5.8)$$

$d = 16$  мм

$$\frac{\xi}{\xi_0} = 2,05 \cdot e^{-0,592 \frac{Z_0}{Z}}, \quad (5.9)$$

Таким образом, «граница», за пределами которой определение скорости УЗК требует учета геометрии образцов, присутствия неоднородностей, является весьма условной и зависит от метода измерения и характеристик приборов. Некоторые термины (и величины), использующиеся для описания волновых процессов, следует применять с уточнениями. В частности, такие величины как длина волны и частота колебаний, характеризуют стационарный, установившийся процесс распространения упругих волн. Использование их для описания импульсного акустического процесса, в особенности, если информационной частью сигнала является начальный участок его переднего фронта, не совсем правомерно. Ограниченные размеры образца проявляют себя при изменении скорости импульсного акустического сигнала только в том случае, если на приеме может быть зафиксирована отраженная от граней образца волна, а это зависит от чувствительности приемного тракта и алгоритма обработки принятого сигнала. Теоретически, в идеализированном

случае, при неограниченной чувствительности приемника размеры образца не должны влиять на регистрируемую скорость распространения акустического импульса.

\* \* \*

Моделирование развития волновых процессов в бетоне на основе МКЭ показало его высокую эффективность как инструментального средства, позволяющего получить такие данные о волновой картине распространения ультразвукового импульса, которые опытным экспериментальным путем получить либо невозможно из-за отсутствия приборных средств измерений, либо требует значительных издержек для изготовления специальных образцов и разработки нестандартных измерительных методик.

Данные моделирования распространения волны ультразвукового импульса в зоне раскрытия поверхностной трещины показали заметное отличие параметров волновой картины в зоне трещины от параметров определяемых исходя из геометрической модели, в частности, координаты виртуального центра области переизлучения УЗ импульса смещены от вершины трещины на расстояние около половины длины волны.

Влияние армирования и неоднородности в массиве бетона на скорость распространения акустического импульса не является однозначным и зависит от методики измерения скорости и технических характеристик приборов. Попытки учитывать влияние армирования на оценки скорости распространения импульсного акустического сигнала при поверхностном прозвучивании бетона введением каких-либо поправочных коэффициентов не имеют практической перспективы ввиду сложности интерференционной картины в точке приема волны. В качестве дополнительного информационного параметра, позволяющего зафиксировать сам факт присутствия в зоне контроля какой-либо неоднородности, может рассматриваться длительность первой полуволны принятого импульса.

Установлена принципиальная возможность устранения влияния арматуры на оценку скорости ультразвукового импульса в бетоне, использованием в качестве информационного параметра дифференциальной скорости распространения ультразвукового импульса.

## ГЛАВА 6

### НОРМИРОВАНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ БЕТОНА В КОНСТРУКЦИЯХ

В настоящее время и в Республике Беларусь и Российской Федерации продолжается работа по модернизации национальных нормативов. В том числе и ключевых нормативов, регламентирующих контроль прочностных показателей монолитного бетона. Важным моментом является изменение статуса неразрушающих методов контроля прочностных показателей бетона. Если до недавнего времени методы неразрушающего контроля (НК) бетона были неким необязательным приложением в системе контроля качества строительства, то сейчас их применение при возведении монолитных конструкций становится обязательным. Тому подтверждением является новая редакция ГОСТ 18105 от 2010 года, п.4.1 которого гласит:

“Контроль и оценку прочности бетона на предприятиях и в организациях, производящих БСГ, сборные, сборно-монолитные и монолитные бетонные и железобетонные конструкции, следует проводить статистическими методами с учетом характеристик однородности бетона по прочности. Приемка бетона путем сравнения его фактической прочности с требуемой без учета характеристик однородности бетона по прочности не допускается”.

Отношение к данному пункту ГОСТ 18105 - 2010, если судить по журнальным публикациям [40-42, 90-92], у специалистов неоднозначное и может служить темой дискуссии. Тем не менее, этот факт свидетельствует о том, что возросла востребованность неразрушающих методов контроля прочности монолитного бетона, но и возросла цена ошибок при контроле.

Неоспоримое достоинство неразрушающих методов испытаний – возможность их многократного применения, репрезентативность выборки и, как следствие, - реализация статистических методов контроля с учетом характеристик однородности бетона по прочности (рис. В.2).

Основной недостаток - присутствие дополнительной неопределенности оценки прочности бетона конструкции, что вызывает обоснованное недоверие к результатам контроля. Это заставляет проектировщика завышать проектный класс бетона с целью снизить



риск разрушения, что в итоге сказывается на стоимости строительной продукции. Распространение уникального и высотного строительства, использование облегченных железобетонных конструкций из высокопрочных бетонов и конструкций с использованием предварительно напряжения арматуры дополнительно ужесточает требования к прочностным показателям бетона и к системе ее контроля.

Последние 10..15 лет на мировом рынке наблюдается стабильное расширение номенклатуры приборов неразрушающего контроля бетона в конструкциях, как для традиционных стандартизированных неразрушающих испытаний для определения прочности, так и для новых направлений испытаний. Появились низкочастотные ультразвуковые томографы-дефектоскопы бетона на основе пространственных фазированных решеток; приборы метода свободных колебаний, позволяющие контролировать конструкции больших габаритов. Появились приборы нового направления диагностики – долговременного непрерывного автоматического мониторинга состояния несущих конструкций зданий и сооружений. Но, несмотря на это, неразрушающий контроль прочностных показателей бетона далеко не всегда гарантирует адекватную оценку. Причин несколько. Основные из них:

а) слабость действующих стандартизированных методик, не раскрывающих потенциальные возможности НК, и особенностей использования НК в различных технологических условиях.

б) несогласованность системы нормативных документов по НК;

в) неразвитость системы подготовки специалистов данного направления; контроль часто проводят недостаточно подготовленные люди, имеющие отдаленные представления о физике процессов неразрушающих испытаний.

В настоящее время в РБ действуют 3 вида стандартов (рис. 6.1): национальные; стандарты РФ и стандарты Евросоюза, которые не согласуются между собой по отдельным позициям, в частности, - по критериям соответствия прочности бетона проектным показателям.

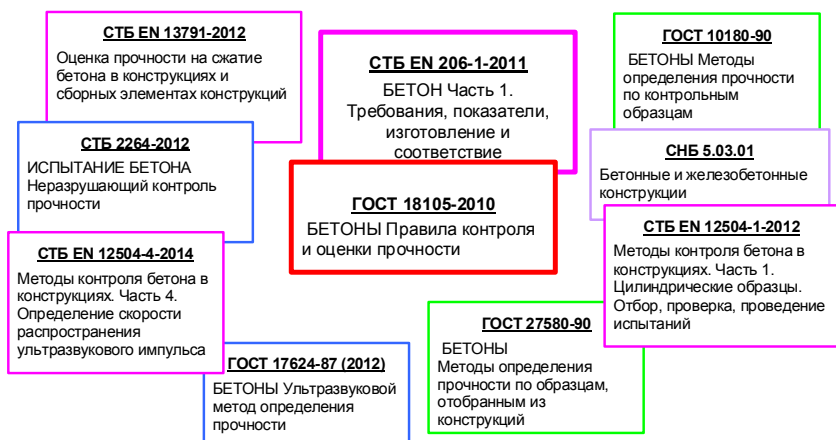


Рис. 6.1 – Действующие нормативы, регламентирующие определение прочности бетона в конструкциях

Стандартизированные методики испытаний прочности бетона в конструкциях не приобрели за последние 10...15 лет каких-либо новых качеств. Слабость стандартизированных методик является следствием стремления разработчиков придать методикам максимальную степень универсальности, которая достигается, в основном, за счет разного рода ограничений. В итоге, из-за неадаптированности методики к конкретным условиям применения происходит потеря информативности получаемых оценок.

Одним из путей адаптации неразрушающих испытаний бетона к используемой технологии выполнения бетонных работ может стать введение в повсеместную практику системы *стандартов предприятия*. Стандарт предприятия имеет применение только на том предприятии, которое его выпустило. СП позволяет конкретизировать методы контроля, их адаптацию к конкретным технологиям данной организации, установить свои критерии соответствия. Разумеется, СП не должны противоречить межгосударственным и национальным стандартам.

Более существенными явились изменения критериев в оценке нормативных прочностных показателей бетона в конструкциях, в связи с использованием вероятностно-статистических подходов в оценке свойств конструкционных материалов, в том числе бетона.

Существенным отличием евростандарта DIN EN 13791-2009 [109] и, соответственно, СТБ EN 13791-2012 [87] от других действующих в республике нормативов является иной критерий соответствия бетона конструкций к классу по прочности, - евростандарт допускает снижение характеристической прочности бетона конструкций и сборных элементов на 15 % относительно класса (по СТБ EN 206-1-2011 [8]) используемого бетона.

В то же время, СНБ 5.03.01 (п.13.2.1) не допускает снижения прочностных показателей бетона в конструкции, несмотря на то, что различия условий формирования структуры бетона малоразмерного испытательного образца и массивной армированной конструкции, очевидны. Такой подход к оценке способствует возникновению конфликтности отношений между проектировщиком, производителем бетонных работ и заказчиком, поскольку по результатам испытаний, если до них доходит дело, производитель работ уже заранее обречен быть в невыгодном положении.

### *6.1 Статистика испытаний бетона монолитных конструкций*

Сопоставить рассмотренные критерии соответствия позволяет приведенная ниже статистика испытаний бетона ряда объектов монолитного строительства в г. Минске. На рис. 6.5 и 6.6 приведены данные испытаний колонн монолитного каркаса из бетона проектного класса по прочности С30/37 высотного здания по пр. Победителей в г. Минске. На каждой отметке здания, начиная от -9.900 м до +78.120 (рис 6.3), испытанию подвергались 6 монолитных колонн (бетон проектного класса по прочности С30/37) и пять участков монолитных стен лестничных и лифтовых шахт из бетона проектного класса С25/30.

Разметка испытательных участков бетона монолитных колонн производилась в трех уровнях: +2 м, +1.5 м и +1 м относительно основания колонны. Зоны армирования (в проекции арматурных стержней) исключались в соответствии с рекомендациями ГОСТ 22690 [11], СТБ 2264 [33] и ГОСТ 17624 [13]. Расположение элементов арматурного каркаса конструкций производилось магнитным методом по ГОСТ 22904-93 [43].



Рис. 6.2 – 30-этажное здание многофункционального комплекса с поэтапным строительством объектов по пр. Победителей (г.Минск)

На рис. 6.5 и 6.6 представлены диаграммы оценок прочности бетона испытанных конструкций.

У колонн на отметках +6,300 м, +9,300 м, +18,300 м характеристическая прочность оказалась ниже 37 МПа, что по действующему СНБ 5.03.01 не позволяет отнести бетон к классу С30/37. В то же время, по СТБ EN 13791-2012 указанные колонны подтверждают проектный класс бетона, поскольку нормативное значение характеристической прочности составляет 31 МПа.

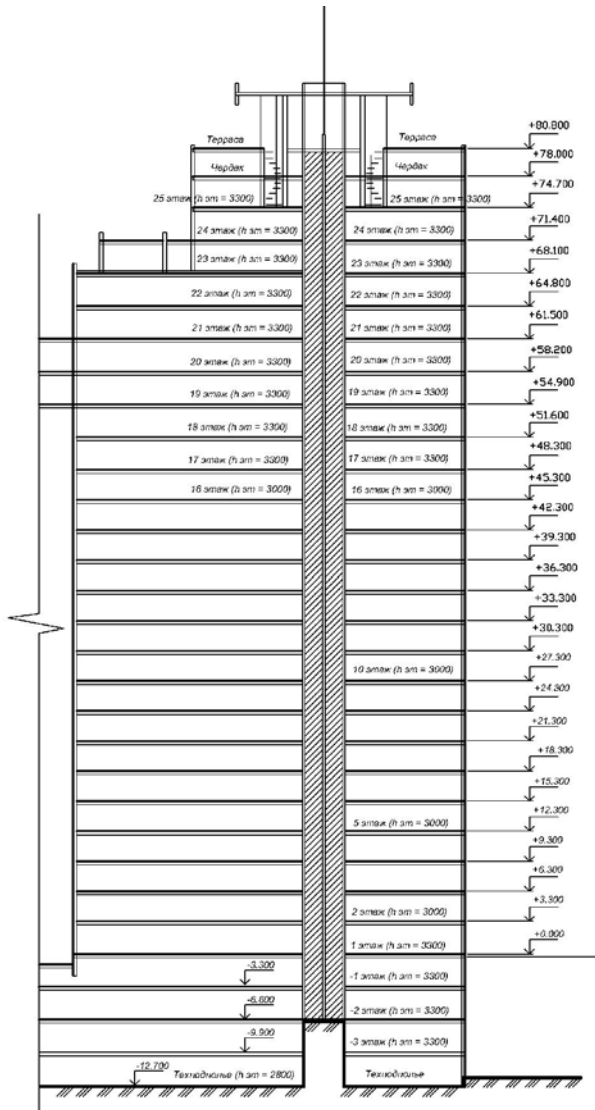


Рис. 6.3 – Вертикальный план-разрез 30-этажного здания

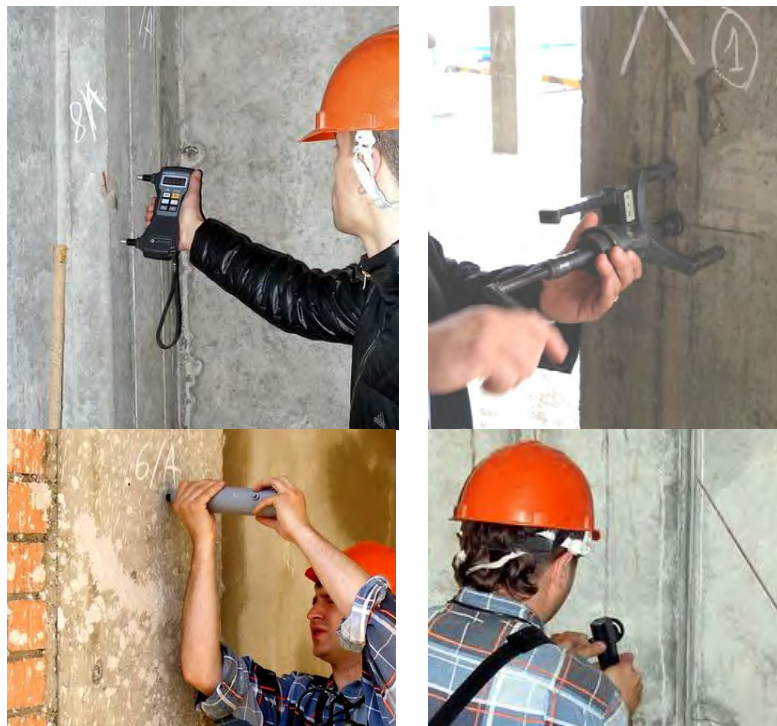


Рис. 6.4 – Рабочие моменты испытаний

На рис. 6.7 и 6.8 приведены гистограммы, построенные по данным испытаний на однотипных объектах более 110 монолитных колонн из бетона проектных классов С25/30, С30/37 каждого.

Установленные СТБ EN 13791-2012 значения характеристической прочности бетона обеспечивают устойчивое подтверждение проектного класса бетона для 95 % конструкций. По установленной же действующим СНБ 5.03.01 гарантированной прочности браковке подлежат 22 % конструкций из бетона С30/37 и 13 % - из бетона С25/30. Рост процента несоответствия проектному показателю по прочности закономерно наблюдался с повышением класса используемых бетонов, - от С25/30 и до С35/45 включая.

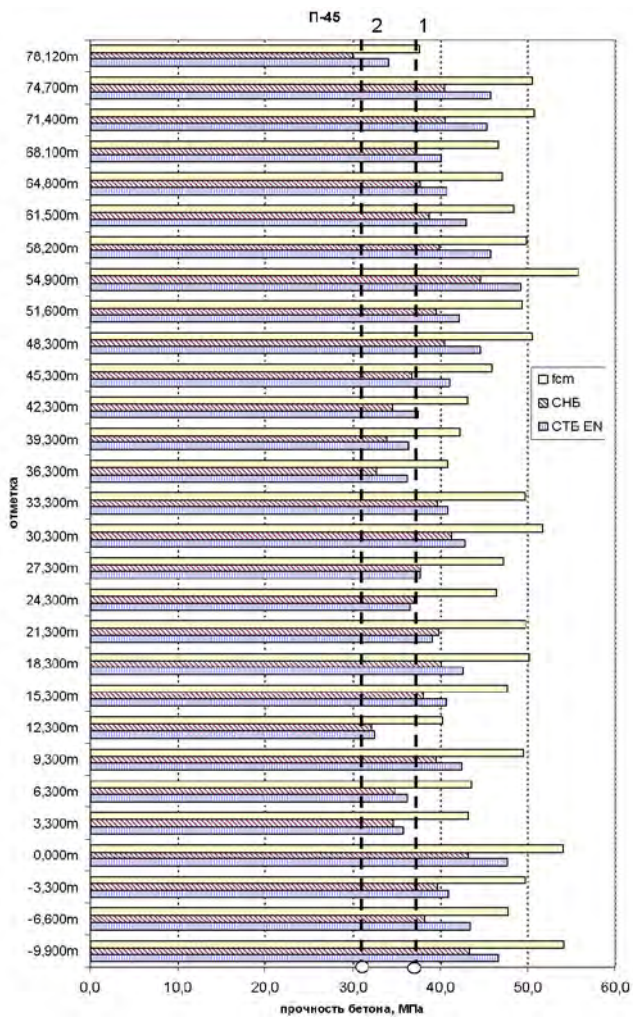


Рис. 6.5 – Распределение по высотным отметкам оценок прочности бетона колонн на осях П-45:  
 1 – линия нормативного значения гарантированной прочности бетона по СНБ 5.03.01 (37 МПа);  
 2 – линия нормативного значения гарантированной прочности бетона по СТБ EN 13791-2009; (31 МПа);



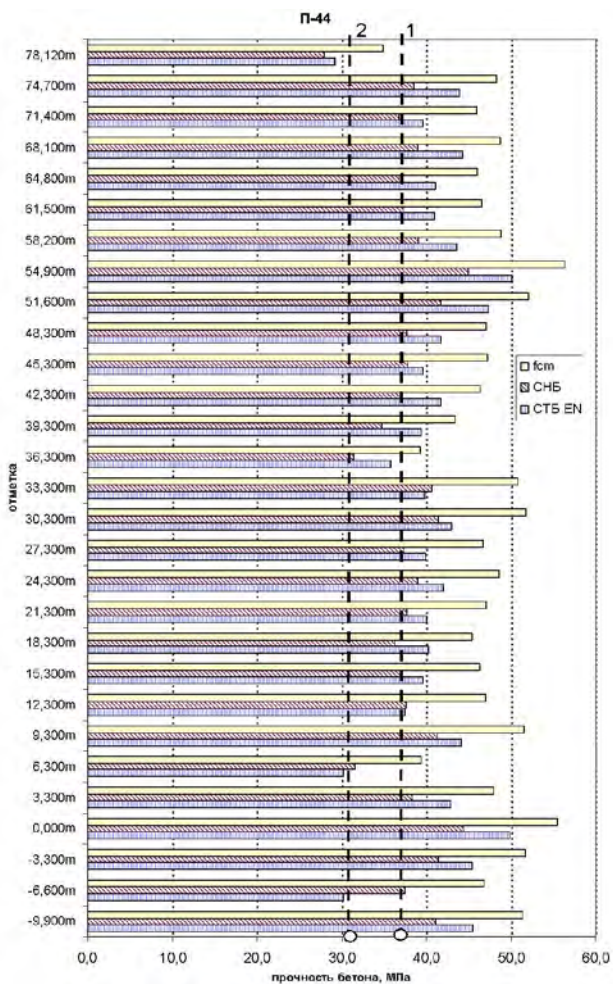


Рис. 6.6 – Распределение по высотным отметкам оценок прочности бетона колонн на осях П-44:

- 1 – линия нормативного значения гарантированной прочности бетона по СНБ 5.03.01 (37 МПа);  
2 – линия нормативного значения гарантированной прочности бетона по СТБ EN 13791-2012; (31 МПа);



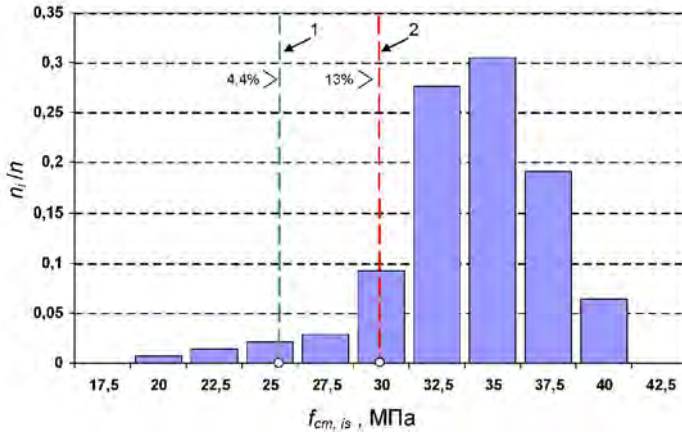


Рис. 6.7 – Гистограммы средних значений оценок прочности бетона проектного класса C25/30 неразрушающими методами:  $n_i/n$  – относительная частота оценок: 1 – линия гарантированного значения прочности по СТБ EN 13791-2012 (26 МПа); 2 – линия гарантированного значения прочности по СНБ 5.03.01 (30 МПа);

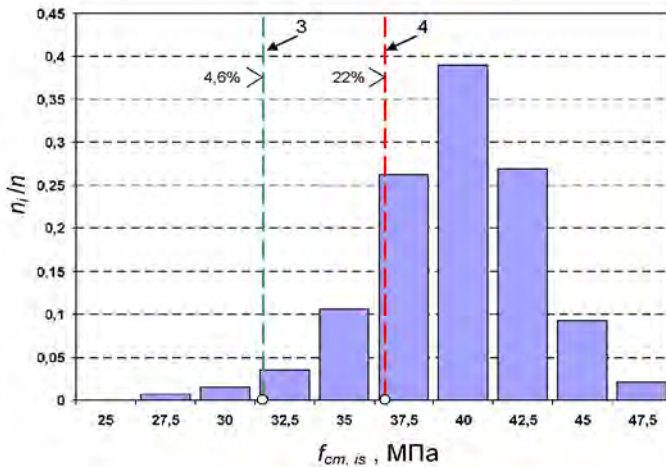


Рис. 6.8 – Гистограммы средних значений оценок прочности бетона проектного класса по прочности C30/37 неразрушающими методами:  $n_i/n$  – относительная частота оценок: 3 – линия гарантированного значения прочности по СТБ EN 13791-2012 (31 МПа); 4 – линия гарантированного значения прочности по СНБ 5.03.01 (37 МПа)

## 6.2 Основные различия методик действующих ТНПА

Различия методик построения градуировочных зависимостей и расчета характеристической прочности бетона также имеют место, хотя и являются менее значимыми, чем различия критериев соответствия. В соответствии с СТБ EN 13791-2012 градуировочная зависимость может применяться только для бетона и условий, для которых данная зависимость составлена. 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 должно соответствовать расчетному значению или  $3 \text{ Н/мм}^2$ . При этом действительно наибольшее значение. Оцененная характеристическая прочность на сжатие области испытаний является наименьшей из двух следующих значений:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - 1,48 \cdot s \quad (6.1)$$

или

$$f_{ck, is} = f_{is, \text{ мин}} + 4 \quad (6.2)$$

где  $s$  - стандартное отклонение результатов испытаний;

$f_{ck, is}$  - характеристическая (гарантированная) прочность на сжатие бетона в конструкции;  $f_{m(n), is}$  - среднее значение  $n$ -результатов испытаний прочности на сжатие бетона;

Статистическая обеспеченность гарантированной прочности по формуле (6.1) составляет 93%.

В соответствии с СНБ 5.03.01 (п.13.2), - если расчеты выполняются по данным, полученным при натурном обследовании конструкций, значение гарантированной прочности бетона  $f_c^G$  следует принимать равным 80 % от средней прочности бетона (в МПа), определенной ускоренными методами, либо равным значению гарантированной с обеспеченностью 0,95 прочности бетона (в МПа), определенной по результатам статистической оценки. Для промежуточных значений условного класса бетона по прочности на сжатие расчетные характеристики допускается определять линейной интерполяцией.

Для низких классов бетона условия соответствия прочности бетона нормативному значению более жесткие по СТБ EN 13791, чем

по СНБ 5.03.01; разница минимальных средних значений прочности для бетона класса С8/10 достигает 5 МПа.

В DIN EN 13791-2009 (СТБ EN 13791-2012) введен термин – базовая градуировочная зависимость. В качестве таковой берется зависимость для соответствующего неразрушающего метода, построенная при достаточно высокой статистической обеспеченности процедуры ее построения. В СТБ EN 13791-2012 приведены варианты базовых градуировочных зависимостей, которые можно сопоставить с зависимостями построенным по рекомендациям ГОСТ 17624 и ГОСТ 22690, а также с зависимостями, полученными авторами по результатам натурных испытаний объектов строительства.

На рис. 6.9 приведен ряд градуировочных зависимостей для ультразвукового импульсного метода.

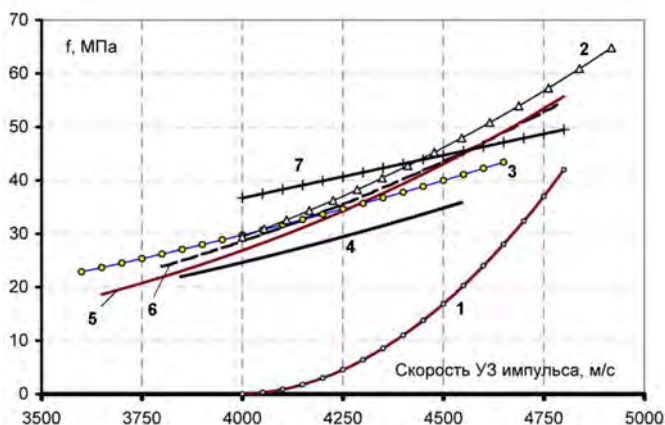


Рис. 6.9 - Градуировочные зависимости ультразвукового импульсного метода:

- 1 – базовая кривая по СТБ EN 13791-2012; 2 – состав №2 (см. таб. 6.1): проектный класс – С35/45, возраст – 28 сут; 3 – состав №1 (см. таб. 6.1): проектный класс – С25/30, возраст – 28 сут; 4 – состав №2 (см. таб. 6.1): проектный класс – С35/45, возраст – 2 сут; 5 –  $A \cdot V^4$ ; 6 –  $M \cdot V^{3,53}$ , состав №3 (см. таб. 6.1): проектный класс – С30/37, возраст – 28 сут; 7 – базовая кривая УК1401

Зависимости 2 и 3 получены авторами по данным испытаний конструкций и образцов из бетона на объектах монолитного строительства «Минск-арена» и ОЦ «Столица» в 2005...2009 г.г., состав-

вы приведены в таблице 1; кривая 2 соответствует составу № 2 (С35/45), кривая 3 – составу № 1 (С25/30).

Кривая 4 получена для бетона состава № 2, но в возрасте 2 сут. Кривая 5 – рекомендуемая ГОСТ 17624 зависимость вида  $f_c = A \cdot V^4$  при оценке прочности бетона в конструкциях. Кривая 6 может рассматриваться в качестве базовых для семейства бетонов по таблице 1. Кривая 7 соответствует градуировочной зависимости прибора УК1401. Заметно сильное отличие базовой кривой 1 по СТБ EN 13791 от всех остальных.

Таблица 6.1 – Составы бетона и градуировочные зависимости

№ состава, обознач. состава	Расход песка		Расход щебня		Расход цемента, кг	Градуировочная зависимость
	кг	м <sup>3</sup>	кг	м <sup>3</sup>	ШЦ-500	в проклн. возрасте (28 сут.)
№1 * С25/30 F100 W6	750	0,5	1100	0,79	445	$f_c = 3 \cdot 10^{-4} V^{4,45}$ ; МПа
№2 ** С35/45 F100	710	0,47	1000	0,71	600	$f_c = 0,17 \cdot 10^{-3} V^{4,1}$ ; МПа
№3 ** С30/37	730	0,49	1050	0,75	540	$f_c = 4,3 \cdot 10^{-4} V^{4,1}$ ; МПа

\* Допирование воды на осадку конуса 13..15 см (марка по удобоукладываемости 113)

\*\* Допирование воды на осадку конуса 16..18 см (марка по удобоукладываемости 114)

Кроме того, для указанной зависимости оговаривается диапазон косвенного параметра – скорости ультразвукового импульса –  $4000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \dots 4800 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , что, на наш взгляд, выглядит несколько странным, так как диапазон значений скорости ультразвукового импульса от  $3500 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  до  $4000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  выпадает из рассмотрения. А именно этот диапазон скоростей составляет область наиболее эффективной работы метода. А вот значения скорости ультразвука выше  $4600 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , напротив, - область пониженной достоверности оценок данного метода. Заметим, что в документе [87] не предписывается использование только указанной зависимости, также не оговариваются и ограничения на использование иных кривых.

Подобная ситуация и с градуировочными зависимостями метода упругого отскока и отрыва со скалыванием. Базовые зависимости этих методов по СТБ EN 13791-2012 приведены на рис. 6.10 и 6.11. Обращает на себя значительное расхождение градуировочных зави-

симостей метода упругого отскока, составляющее около 20 МПа для всего диапазона.

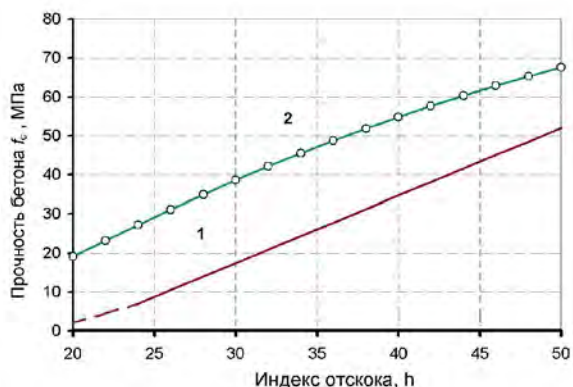


Рис. 6.10 - Градуировочные зависимости метода упругого отскока:

1 - базовая кривая по СТБ EN 13791-2012:

$$f_c = 1,25 \cdot h - 23, \text{ МПа, для } 20 < h < 24$$

$$f_c = 1,73 \cdot h - 34,5, \text{ МПа, для } 24 \leq h \leq 50$$

2 - зависимость по данным натурных испытаний:  $f_c = 156,6 \cdot e^{42/h}$ , МПа

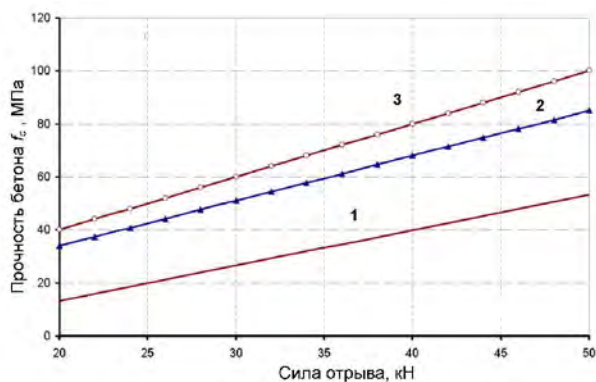


Рис. 6.11 – Градуировочные зависимости метода отрыва со скалыванием:

1 - базовая кривая по СТБ EN 13791-2012:

$$f_c = 1,33(F - 10), \text{ МПа, для } 20 \text{ кН} < F < 60 \text{ кН}$$

2 и 3 - зависимости по ГОСТ 22690-88

$$f_c = m_1 \cdot m_2 \cdot F, \text{ МПа} \quad m_1 = 1; m_2 = 1,7; 2,0$$

В отличие от ультразвукового метода, косвенный параметр метода упругого отскока зависит не только от физико-механических свойств бетона, но и от параметров самого склерометра. Поэтому имеющееся отличие зависимостей можно объяснить проявлением указанного фактора.

Зависимости для метода отрыва со скалыванием также зависят от характеристик прибора: диаметра анкера, его заглубления в массив бетона, скорости приложения нагрузки, крупности заполнителя. Поэтому непосредственное сопоставление зависимостей без учета указанных выше характеристик имеет смысл лишь в плане сравнения использованных аппроксимирующих функций, которые и в одном и в другом случаях являются линейными.

В СТБ EN 13791-2012 регламентируется процедура коррекции базовой градуировочной зависимости путем ее смещения на величину  $\Delta f$  параллельно оси прочности -  $f_c$ . Расчет смещения производится на основе дополнительных данных (9 пар отсчетов) совместных испытаний конкретной железобетонной конструкции неразрушающим методом и методом испытания выбуренных кернов. Методика относится ко всем рассмотренным методам испытаний, включая и метод отрыва со скалыванием.

Для каждого места измерений определяется разница между значением прочности на сжатие для бурового керна  $f_{is}$  и значением из базовой кривой  $f$  для соответствующего метода испытаний, то есть

$$\delta f = f_{is} - f.$$

Рассчитывается среднее значение для  $\delta f_{m(n)}$  для  $n$  результатов испытаний и ее стандартное отклонение  $s$ . Значение смещения базовой кривой  $\Delta f$  по уравнению

$$\Delta f = \delta f_{m(n)} - k_1 \cdot s,$$

где  $k_1$  – коэффициент, выбирается по таблице 6.2.

Процедура коррекции градуировочной зависимости по СТБ 2264 и ГОСТ 22690 содержит менее жесткие требования:

- в качестве экспертного метода может использоваться метод отрыва со скалыванием, что позволяет включать в сферу применения данной методики и конструкции с относительно малыми размерами сечения;

- количество испытаний может быть снижено до трех;
- значение прочности бетона, определенное с использованием градуировочной зависимости, установленной для бетона, отличающегося от испытываемого, умножают на коэффициент  $K_c$ , значение которого определяют по формуле

$$K_c = \frac{\sum_1^n R_i}{\sum_1^n R_y} \quad (6.3)$$

где  $R_i$  - прочность бетона в участке, определяемая методами отрыва со скалыванием, скалывания ребра или испытанием кернов по ГОСТ 10180 [10] и ГОСТ 28570 [14];  $R_y$  - то же, методами упругого отскока, ударного импульса или пластической деформации;  $n$  - принимается не менее трех.

Таблица 6.2 – Коэффициент  $k_1$

Количество пар результатов испытаний	$k_1$
9	1,67
10	1,62
11	1,58
12	1,55
13	1,52
14	1,50
$\geq 15$	1,48

Следует заметить, что методики построения и коррекции градуировочных зависимостей ГОСТ 22690 и ГОСТ 17624 радикально отличаются от методики построения и коррекции градуировочной зависимости по СТБ EN 13791-2012. Оценка прочности бетона по градуировочной зависимости евростандарта будет на величину  $k_1 \cdot s$  ниже, чем по градуировке ГОСТ (рис. 6.12). Базовую зависимость получают посредством регрессионного анализа на основе пар данных совместных испытаний бетона неразрушающим методом и экспертным методом (испытанием образцов-кернов). Как указано в СТБ EN 13791-2012 (примечание 4) :...“Зависимость, применяемая для оценки прочности на сжатие, дает уровень надежности, при ко-

тором ожидается, что 90 % значений прочности на сжатие превышает ее оценку”.

Приведенные в табл. 6.2 значения коэффициента  $k_1$  соответствуют 7 % квантилю массива данных градуировочных испытаний. Это, с одной стороны, якобы повышает надежность контроля, снижая вероятность завышения прочности, но, с другой, - способствует утрате доверия к неразрушающим испытаниям, поскольку их оценка в большинстве случаев будет ниже нормативного значения, даже для качественного бетона, обеспечивающего нормативные показатели прочности. Кроме того, разные методы испытаний будут давать разные оценки прочности, поскольку величина  $s$  для каждого метода имеет свое значение.

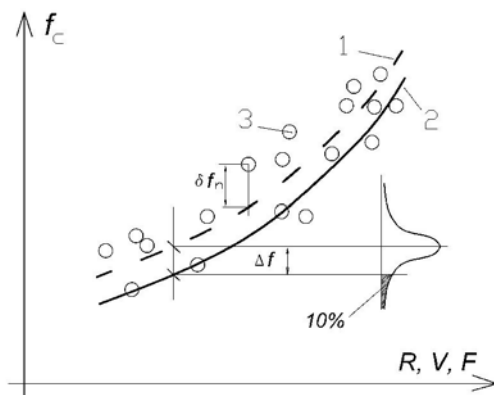


Рис. 6.12 – Построение градуировочной зависимости по данным совместных прессовых испытаний и испытаний отобранных кернов ультразвуковым или иным неразрушающим методом по СТБ EN 13791-2012

1 - базовая кривая; 2 – градуировочная зависимость;

3 – единичный результат испытаний

$\delta f_{1...n}$  - разница между отдельным результатом испытания прочности бурового керна и значением прочности по базовой зависимости;  $\Delta f$  - смещение базовой кривой;  $R, V, F$  – косвенные параметры неразрушающих методов (индекс отскока, скорость ультразвукового импульса, сила отрыва)

Что касается алгоритмов коррекции – либо путем сдвига на величину  $\Delta f$ , либо поворотом относительно нулевой точки координатных осей (6.3), то явное предпочтение нельзя отдать ни одному из них. Вероятно, характер эволюций градуировочных зависимо-



стей того или иного неразрушающего метода испытаний зависит от причин, вызвавших эти эволюции. Для примера обратимся к рис. 6.9. Градуировочные зависимости 2 и 4 для бетона одного состава, но в разном возрасте, не позволяют их совместить путем параллельных сдвигов по координатной плоскости. В то же время для кривых 3 и 4 – для бетонов одного семейства - такая процедура вполне приемлема. То же наблюдается и для графиков на рис. 6.10 и 6.11. Зависимости 2 и 3 (рис. 6.11) явно указывают способ их идеального совмещения – путем сдвига по вертикали или горизонтали с поворотом относительно начала координат.

Использование базовых зависимостей и механизма ее коррекции - в более широком смысле – есть попытка сохранить информацию накопленного опыта прошлых испытаний бетона, и способ уберечь пользователя от слишком резких «виражей» при построении градуировочных зависимостей. И в этом плане евронормы никаких радикальных новшеств не содержат, поскольку опираются на традиционные методики.

Полезную информацию рассмотренный евростандарт содержит по вопросу учета неоднородности бетона в конструкциях. Отмечаются следующие моменты. Измеренная прочность на сжатие буровых кернов и бетона в конструкциях обычно меньше прочности на сжатие стандартных испытательных образцов, которые отобраны из той же партии бетона. Это является следствием ряда факторов, например отличием степени уплотнения и условий выдерживания бетона в условиях строительной площадки, а также расположением зоны контроля в строительной конструкции. Испытания бетона в конструкции показывают следующее:

- 1) прочность на сжатие бетона в одной конструкции может колебаться как случайно, так зачастую и регулярным образом;
- 2) величина колебаний может значительно отличаться в различных строительных конструкциях;
- 3) с увеличением высоты бетонирования прочность на сжатие бетона в конструкциях уменьшается по высоте в направлении бетонирования; это распространяется также на плиты: прочность верхнего слоя может быть на 25 % ниже прочности центральных областей сечения. Бетон меньшей прочности зачастую локализуется или в верхних 300 мм или до 20 % глубины, в зависимости от того, какая область является меньшей.

На рис. 6.13 приведены характерные результаты определения прочности монолитной плиты перекрытия толщиной 25 см, полученные авторами, которые подтверждают приведенные в пункте 3 оценки.

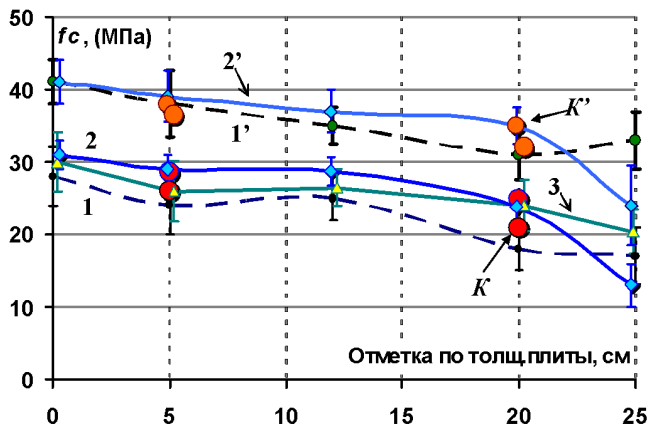


Рис. 6.13 – Распределение прочности бетона монолитной плиты перекрытия толщиной 0,25 м по её толщине: отметка 0 см соответствует нижней части плиты, отметка 25 см – верхней.

1, 1' – данные ультразвуковых испытаний в возрасте бетона 5 и 28 суток;  
 2, 2' – данные испытаний склерометром ОМШ-1;  $K$ ,  $K'$  – данные испытаний кернов в возрасте бетона 5 и 28 суток; 3 – данные ультразвуковых испытаний кернов в возрасте бетона 5 суток (бетон проектного класса по прочности С25/30)

Весьма важным для практики неразрушающих испытаний бетона, на наш взгляд, является вопрос оценки степени неопределенности результата каждого из используемых методов. Этот показатель важен не только как характеристика надежности полученного соответствующим методом результата испытаний. С показателем неопределенности отдельного метода испытаний связан вопрос методики объединения результатов нескольких методов испытаний. Показатель неопределенности может быть использован в качестве весового коэффициента при усреднении результатов нескольких методов. Эти моменты обойдены вниманием и в рассмотренном СТБ EN 13791-2012 и в действующих отечественных нормативах. В качестве показателя неопределенности для результатов испытаний

неразрушающими методами предлагаем использовать величину остаточной дисперсии или остаточного среднего квадратического отклонения  $S_T$ , определяемую при градуировочных испытаниях по формуле

$$S_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{is,i} - f_{is,H,i})^2}{n-2}}, \quad (6.4)$$

где  $f_{is,i}$  –  $i$ -й результат оценки прочности бетона в конструкции экспертным методом (отрыв со скалыванием или испытанием образцов-кернов);

$f_{is,H,i}$  –  $i$ -й результат оценки прочности бетона в конструкции неразрушающим методом (по градуировочной зависимости);

$n$  – число испытаний

### 6.3 Измерение скорости ультразвукового импульса на основе методики профилирования

Кроме методик сквозного и поверхностного прозвучивания (см. гл. 4), существует способ определения параметра имеющего размерность скорости – дифференциальной скорости распространения ультразвукового импульса методом профилирования. По неизвестной причине этот способ не рассматривается ни в ГОСТ 17624-87, ни в последней редакции этого стандарта [13]. Способ профилирования может служить дополнением методики ГОСТ по оценке неоднородности/неравнопрочности бетона в изделии.

На рис. 6.14 и 6.15 приведены схемы поверхностного и сквозного профилирования бетонного массива. Косвенным параметром, как уже указывалось, является дифференциальная скорость  $v_d$  распространения ультразвука, которая рассчитывается как среднее арифметическое единичных значений скорости для каждого шага профилирования  $dL_i$ , которые рассчитываются по формуле

$$v_{Di} = \frac{dL_i}{dt_i} \cdot 10^3, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (6.5)$$

где  $dt_i$  – приращение времени распространения ультразвука для  $i$ -го шага профилирования, мкс;

$dL_i$  – шаг профилирования - расстояние между соседними позициями центров зон установки преобразователей, мм.

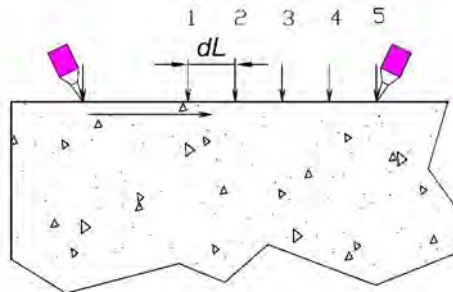


Рис. 6.14 – Схема поверхностного прозвучивания бетона методом профилирования

Профилирование с захватом двух смежных граней изделия представлено на рис. 6.15.

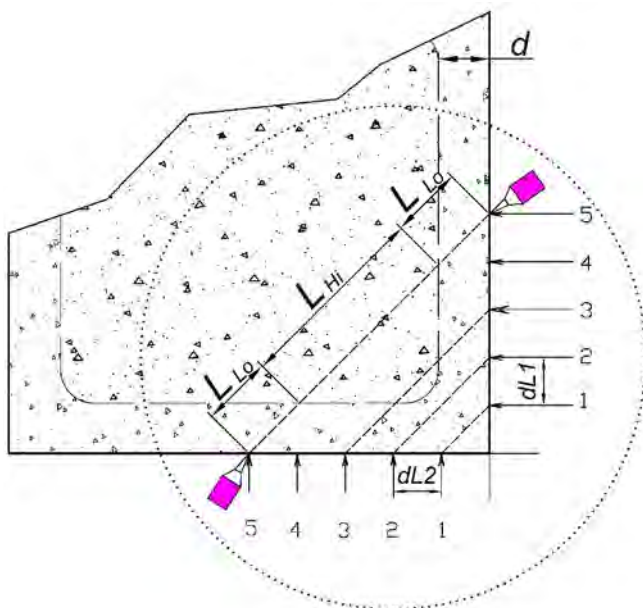


Рис. 6.15 – Схема сквозного прозвучивания бетона методом профилирования

Преимуществом данной схемы перед схемой профилирования в одной плоскости является меньшее влияние армирования на оценки

скорости распространения УЗК, поскольку элементы армирования расположены, как правило, вблизи граней изделий и реже попадают в зону прохождения зондирующего импульса. Скорость распространения ультразвука методом сквозного профилирования для случая ортогонального расположения граней конструкции рассчитывают как среднее арифметическое единичных значений скорости для каждого шага базы прозвучивания  $\delta L_i$ , которые рассчитываются по формуле

$$V_i = \frac{\delta L_i}{dt_i} = \frac{\sqrt{dL1_i^2 + dL2_i^2}}{dt_i} \cdot 10^3, \quad (6.6)$$

где  $\delta L_i$  – приращение базы прозвучивания, мм;  $dL1_i, dL2_i$  – шаги профилирования, мм.

При иной форме сечения конструкции, расчет скорости распространения производят по формуле (6.5), определяя приращение базы измерения исходя из геометрических соотношений.

Шаг профилирования  $dL$  следует использовать одинаковым для всех позиций установки преобразователей. Длина шага не должна быть меньше 100 мм. Рекомендуется по результатам измерений произвести построение профиля контроля скорости, в соответствии с рис. 6.16, откладывая по одной оси графика значения базы прозвучивания, по другой – время регистрации ультразвукового импульса. Построение профиля контроля позволяет косвенно выявить неоднородность массива бетона по прочности, оценивая скорость ультразвука во внутренней области сечения конструкции на участке  $L_{HI}$  и сравнивая ее со значением  $L_{LO}$  для периферийной области сечения.

Скорость ультразвука на участке  $L_{HI}$  будет соответствовать максимальному значению отношения приращения базы прозвучивания  $dL$  к приращению времени прохождения  $dt = t_{i+1} - t_i$ . Пониженное значение скорости во внутренней области сечения по отношению к скорости ультразвука в приповерхностном слое бетонной конструкции находившейся в эксплуатации длительное время, может являться косвенным признаком карбонизации приповерхностного слоя бетона.

Для снижения инструментальной погрешности измерения времени распространения ультразвукового импульса, рекомендуются

испытания методом сквозного профилирования при базах прозвучивания превышающих 300 мм производить с использованием вязкого контакта преобразователей с поверхностью бетона или с использованием методики накопления и корреляционной обработки акустического сигнала (см. гл. 4).

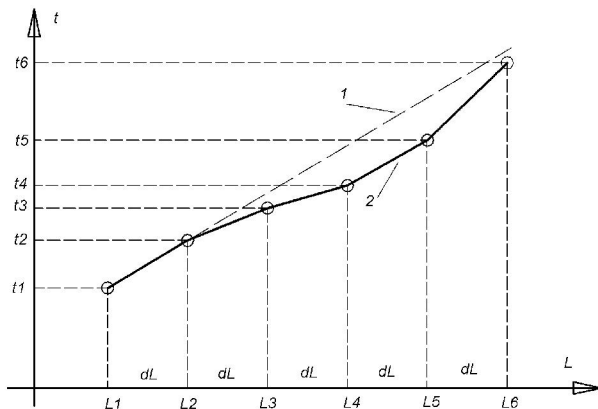


Рис. 6.16 – Построение профиля контроля

*1 – идеализированный профиль; 2 – реальный профиль прозвучивания*

Полученное максимальное значение скорости распространения  $V_{hi}$  следует принимать в качестве единичного значения скорости ультразвука на контролируемом участке при расчете прочности бетона конструкции.

*Исследования неоднородности (неравнопрочности) бетона конструкций в построечных условиях*

В таблице 6.3 приведены результаты испытаний двух колонн, изготовленных в летний период, но не обеспечивших, по данным неразрушающих испытаний поверхностного слоя бетона, необходимых показателей прочности.

Контрольные испытания прочности бетона методом отрыва со скалыванием в целом подтвердили оценки неразрушающих методов, обнаружив также и большой разброс отдельных результатов. Для уточнения картины было проведено несколько серий ультразвуковых испытаний, которые позволили выявить различие упруго-

прочностных характеристик бетона наружного слоя и внутренних областей одной из колонн. На рис. 6.17 приведены экспериментальные зависимости  $V(L)$  и  $V_d(L)$ , построенные по данным натуральных испытаний монолитной колонны 36/Р ультразвуковым методом по схеме рис. 6.15. Характер зависимостей подтвердил предположения о неравнопрочности бетона испытанной колонны. Для сравнения, было проведено испытание трех колонн (38/Б, 38/Д, 39/Б) сечением 900x600 мм, прочность бетона которых была подтверждена испытаниями поверхностного слоя. Отклонение скорости распространения акустического импульса для испытанной группы колонн не превышает 4,8 %. У колонны 36/Р, как видно на рис. 6.17, этот показатель достигает 22 %.

Таблица 6.3 – Данные испытаний колонн с пониженными показателями прочности

Координаты	36/П-Р	36/Р
Срок твердения, сут	24,0	24,0
Прочн. (ОМШ-1), МПа	17,4	18,9
Прочн. (ультразвук), МПа	17,2	16,3
Прочн. (ИПС-МГ4), МПа	22,5	23,2
Средн. прочн. НК, МПа	19,0	19,5
Прочн. («Скол»), МПа	24	28,0
	22	18
	16	20

*Проектный класс бетона С32/40, срок твердения 180 суток*

На рис. 6.19 приведены данные испытаний ростверка (рис. 6.18) по изложенной методике профилирования. Приращение дифференциальной скорости УЗК составило ~25 % (рис. 6.19,б). Полученные данные можно интерпретировать как проявление в исследуемом массиве области, имеющей прочность на 30...40 % большую, чем поверхность ростверка, и отстоящей от поверхности на 8...10 см.

Профилирование круглого сечения не позволяет непосредственно определять скорости распространения ультразвука внутренней и внешней областей массива, так как с изменением позиций ЭАП изменяется длина пути распространения ультразвука и во внешней области, и во внутренней. Расчетную систему определения параметров  $R^*$ ,  $S_{Lo}$ , и  $S_{Hi}$  целесообразно «привязать» к таким позициям

контроля, в которых различие в степени влияния внутренней и внешней областей массива на среднюю скорость распространения ультразвука будет максимальным. Например, одна - непосредственно за критической позицией, где влияние внутренней области массива еще не велико, вторая - на диаметрально расположенных точках, где влияние внешнего слоя минимально.

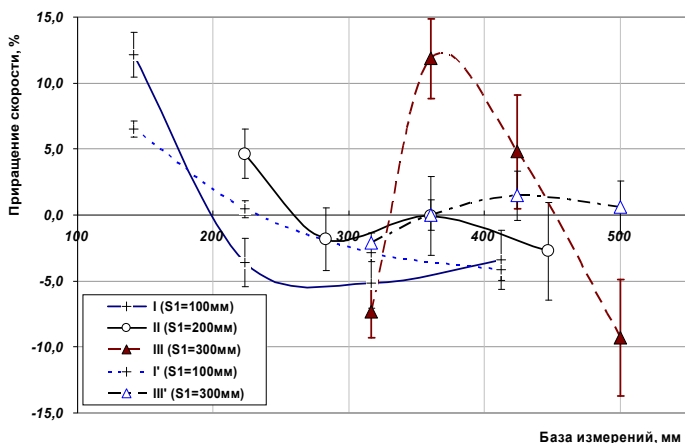


Рис. 6.17 – Экспериментальные зависимости приращения скорости ультразвукового импульса в бетоне колонны 36/Р от базы измерений: I, II, III – дифференциальные скорости распространения УЗК соответственно для позиций излучающего ЭАП 100, 200 и 300 мм от ребра колонны; I', II', III' – скорости распространения УЗК соответственно для позиций излучающего ЭАП 100 и 300 мм от ребра колонны

На рис. 6.20 приведены результаты испытания бетона колонны круглого сечения Ø600 мм. Бетон класса С35/45 с гиперпластификатором ГП-1, срок твердения 30 суток.

Испытания прочности бетона колонны комбинированным методом и прибором ИПС-МГ4 дали оценку прочности наружного слоя бетона в пределах 48...53 МПа. Профилирование сечения на уровне 2 м от основания колонны показало заметное приращение дифференциальной скорости распространения УЗК. Первый экстремум (рис. 6.20,б) соответствует углу  $\varphi = 60^\circ$  и может быть проявлением армирования в зоне контроля. Второй «скачок» дифференциальной скорости наблюдался для угла сканирования около  $32^\circ$ , после кото-



рого скорость сохранялась постоянной вплоть до диаметрально противоположных позиций преобразователей. Разница значений скорости на поверхности колонны для базы 150 мм и внутренней области для  $\varphi > 32^\circ$  составила 10,2 %, что может соответствовать приращению прочности внутренней области массива около 15...25 %.



Рис. 6.18 – Испытания ростверка и колонны ультразвуковым методом профилирования

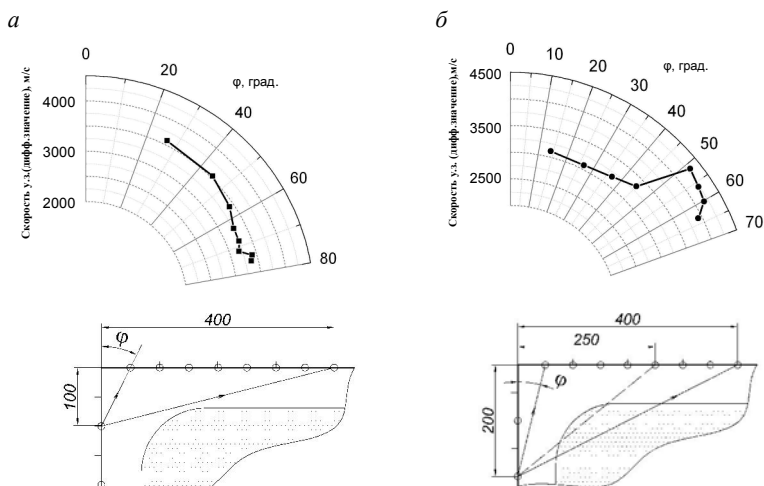


Рис. 6.19 – Зависимости дифференциальной скорости распространения ультразвукового импульса в массиве ростверка от угла (вверху) сканирования; схемы сканирования сечения ростверка (внизу): а – позиция излучателя отстоит от ребра на 100 мм; б – на 200 мм

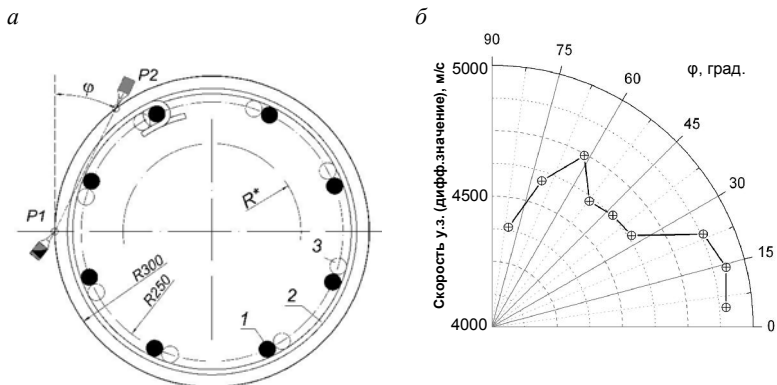


Рис. 6.20 – Зависимость дифференциальной скорости распространения ультразвукового импульса в массиве бетона колонны круглого сечения:  
*a* – схема армирования колонны и расположения ЭАП; *б* – диаграмма для  $C^d(\varphi)$ :  
*1* – стержни продольного армирования –  $\varnothing 32 S500(Am500C)$ ; *2* –  $\varnothing 10 S240 (Am240)$ ;  
*3* – выпуски армирования нижестоящей колонны

Приведенные оценки являются ориентировочными и базируются на данных прессовых испытаний образцов-кубов, находившихся в иных условиях, чем бетон колонн. Но факт наличия внутри сечения испытанной колонны области, имеющей большую скоростью ультразвука, а значит, и иные упруго-прочностные параметры, является несомненным.

\* \* \*

Бетон следует рассматривать как материал с колеблющимися характеристиками по случайному принципу, результаты испытаний которого подчиняются нормальному распределению. Разница между прочностью на сжатие бетона в конструкции и прочностью стандартных испытательных образцов неизбежна. СТБ EN 13791-2012 допускает снижение прочности бетона в конструкциях: критериальный порог – гарантированная (характеристическая) прочность – снижен на 15 %. Этот пункт радикально отличает данный евростандарт от действующих на данный момент стандартов Беларуси и России. Представленная статистика данных испытаний бетона монолитных конструкций ряда объектов строительства в Республике

Беларусь подтверждает правомерность выбранного критерия и позволяет рекомендовать его к использованию.

В то же время методика построения и коррекции градуировочных зависимостей неразрушающих методов определения прочности бетона в конструкциях по СТБ EN 13791-2012 содержит спорные моменты. В основу методики положено использование 10% квантиля массива данных градуировочных испытаний. Очевидно, цель указанной процедуры – приблизить надежность оценки прочности бетона неразрушающими методами к надежности ее оценки прессовыми испытаниями образцов. Но оборотной стороной указанной методики явится существенное занижение оценки нормативного показателя прочности бетона в конструкции, что неизбежно повлечет за собой отказ от использования неразрушающих методов в практике строительства.

Методики ГОСТ 22690, СТБ 2264-2012 и ГОСТ 17624 не приводят к занижению (в среднем) оценок прочности бетона, но делают оценки прочности разными неразрушающими методами равноценными, что не соответствует действительности, - степень надежности оценок будет разной. Указанные нормативы об этом умалчивают. Вопрос определения надежности оценок прочности бетона неразрушающими методами обойден вниманием и в евронормах. Вариантом решения проблемы, на наш взгляд, может служить введение в практику контроля бетона неразрушающими методами, наряду с комбинированием (см. гл. 8), дополнительной характеристики - неопределенности оценки его прочности тем или иным методом. Такой подход позволит получать сопоставимые результаты контроля бетона разными методами, а характеристики неопределенности результатов будут объективно соответствовать их надежности для того или иного метода.

## ГЛАВА 7 МУЛЬТИВОЛНОВОЙ КОНТРОЛЬ БЕТОНА

Контроль протяженных бетонных и железобетонных конструкций удобно производить при одностороннем доступе к поверхности, когда инициирующий и приемный преобразователи устанавливаются на одной стороне (границы) конструкции. Поэтому метод так называемого поверхностного прозвучивания (ГОСТ 17624) получил в практике ультразвукового контроля бетона наибольшее распространение. В то же время вопросы совместного использования для оценки физико-механических свойств бетона акустических волн различных типов, возникающих при поверхностном испытании бетона, не нашли в настоящее время адекватного отражения в действующих нормативах. Ни старой редакцией ГОСТ 17624-87 ни новой - ГОСТ 17624-2012 не регламентируется тип используемой волны зондирующего бетон импульса. А во всех без исключения существующих приборах ультразвукового контроля прочности бетона в качестве информационного параметра фактически используется скорость/время распространения импульса только продольной волны.

Спецификой ультразвукового контроля бетона является использование волн, частота которых лежит в диапазоне 35..100 кГц. Соответственно, при типичной скорости распространения импульса ультразвуковой продольной волны около  $4000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , длина волны колебаний лежит в пределах от 4 до 11 см. На рис. 7.1 приведена типичная временная диаграмма принятого ультразвукового импульса, прошедшего через бетон. Кривая *a* соответствует сигналу, полученному при максимальном усилении, кривая *b* – при 30-кратном его ослаблении аттенюатором на входе приемного тракта прибора.

Импульсу продольной волны на рис. 7.1 соответствует около трех-четыре периодов колебаний. При длине волны около 8 см импульс продольной волны растягивается в пространстве на 30..35 см, заполняя собой больше половины базы измерения к моменту приема первого его вступления.

Поскольку скорости распространения поперечной *SH* волны и волны Релея примерно в два раза меньше скорости продольной волны, то начальные участки импульсов этих волн будут накладываться на «концовку» импульса продольной волны, что и видно на

рис. 7.1 в области временных отметок 120..130 мкс. Поэтому надежно разделить волновые составляющие возможно - либо используя большие базы прозвучивания и производя селекцию волновых составляющих по времени, либо используя дополнительные отличительные признаки, в частности, разницу в уровне сигналов, что характерно для поверхностной волны.

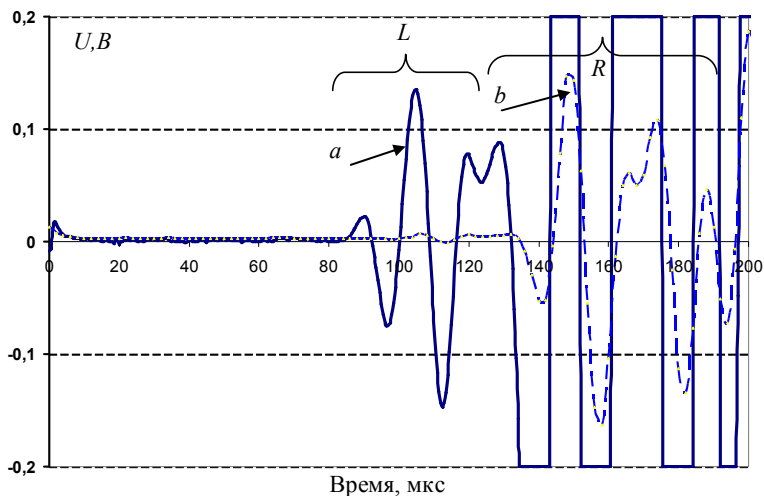


Рис. 7.1 – Временная диаграмма принятого ультразвукового импульса:  
*L* – импульс продольной волны; *R* – начальная часть импульса волны Релея  
 база измерения – 50 см; частота – 55 кГц

*(направление вектора колебаний протектора нормальное к поверхности бетона)*

### 7.1. Мультиволновой контроль бетона в конструкциях

Существенное преимущество мультиволнового ультразвукового контроля заключается в том, что совместная интерпретация параметров прохождения волн различных типов позволяет получать информацию об упругих параметрах бетона. Для однородной изотропной среды известны [21] соотношения

$$E_{\partial} = \rho \frac{V_T^2 (3V_L^2 - 4V_T^2)}{V_L^2 - V_T^2}, \quad (7.1)$$

$$v_d = \rho \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)}, \quad (7.2)$$

где  $E_d$  – динамический модуль Юнга;  $v_d$  – динамический коэффициент Пуассона;  $V_T$  – скорость распространения поперечной упругой волны;  $V_L$  – скорость распространения продольной упругой волны.

В настоящее время в литературных источниках нет информации о практических способах определения динамического коэффициента Пуассона бетона в конструкциях неразрушающими методами. В то же время этот параметр весьма чувствителен к изменению свойств контролируемого материала, в частности, - пористости и трещиноватости. Кроме того, коэффициент Пуассона должен приниматься во внимание при определении динамического модуля Юнга бетона в натуральных условиях. Формула (7.2) указывает на принципиальную возможность оперативного неразрушающего определения динамического коэффициента Пуассона на основе данных о скорости распространения продольной и поперечной объемных волн. Находящиеся в обращении типовые приборы ультразвукового контроля не позволяют выполнить оценку скорости распространения поперечной волны. Одна из основных причин затруднений обусловлена тем, что используемые одинарные электроакустические преобразователи не позволяют отдельно излучать и принимать только какой-либо один тип волны, что, в свою очередь, связано со значительной реверберацией ультразвуковых колебаний в самом преобразователе – излучающем и приемном. При этом за время реверберации может происходить многократная смена поляризации вектора колебаний протектора излучателя, а в приемном преобразователе - взаимная трансформация и смешивание всех принятых колебаний. Характер реверберации во многом случаен, - реверберационные процессы экземпляров преобразователей даже одного типа могут значительно отличаться. Учет этих факторов в измерительном процессе требует высокой квалификации оператора. В то же время энергетические показатели импульса волны Релея позволяют осуществить его селективный прием с использованием типовых приборных средств испытаний. Этому вопросу посвящена данная глава.

## *7.2 Экспериментальное исследование процесса распространения поверхностной волны ультразвукового импульса в бетонных изделиях, на больших базах прозвучивания*

Как уже рассматривалось выше, при использовании типовых электроакустических преобразователей (ЭАП), создающих колебания с нормальным к поверхности контроля вектором смещения, в полубесконечном пространстве упругого массива возникают три основных типа волн: продольные, поперечные и поверхностные (волны Релея), имеющие различную интенсивность и скорость распространения. При нормальном к поверхности инициировании колебаний интенсивность продольной волны в направлении вдоль контролируемой поверхности минимальна и сильно зависит от характера акустического контакта и коэффициента Пуассона материала. Несмотря на это, данный тип волн является единственным используемым для контроля физико-механических параметров бетона, поскольку регистрация времени/скорости распространения данного типа импульса имеет самую простую техническую реализацию. Для увеличения амплитуды колебаний продольной подповерхностной волны вектор возбуждения ориентируют в направлении распространения волны – вдоль поверхности. Поскольку продольная волна по мере распространения вовлекает в колебательный процесс все больший объем материала, передавая ему энергию инициирующего импульса, то ее интенсивность по мере удаления от точки возбуждения снижается. Для материала без потерь мощность колебаний в точке измерения будет обратно пропорциональна расстоянию от точки возбуждения. Уровень сигнала продольной волны при поверхностном прозвучивании бетона типовыми ЭАП в несколько раз (10 и более) ниже, чем при сквозном на такой же базе, и может быть замаскирован сигналом поперечной волны и волны Релея, скорость которых почти в два раза ниже [94].

Максимум интенсивности поперечной волны наблюдается в направлении около  $50^\circ$  от нормали. Из всех типов объемных волн на долю поперечной волны приходится наибольшая энергия. По этому показателю поперечные волны представляют интерес в качестве зондирующего сигнала. Появился ряд приборов – ультразвуковых дефектоскопов-томографов бетона [39, 122, 127], в которых используются поперечные волны.

Волна Релея распространяется только вдоль поверхности массива, её уровень сильно зависит от состояния поверхности (неровностей, неоднородных включений). Но, так как волна Релея вовлекает в колебательный процесс слой материала постоянной толщины, то ее затухание будет заметно меньше, чем у других типов волн.

*Сопоставительный анализ данных экспериментального исследования распространения волн зондирующего ультразвукового импульса продольной волны и волны Релея в крупноразмерном бетонном образце*

В целом, все ультразвуковые приборы без исключения, используемые для контроля бетона методами прохождения, являются измерителями времени распространения продольных волн с фиксацией её появления по так называемому первому (иногда – второму) вступлению, имеют цифровой отсчет, погрешностью измерения не более 1 %, с дискретностью отсчета 0,1 мкс. Практика испытаний [37, 50, 51] показывает, что использование типовых ЭАП с точечным контактом, даже с применением различных способов концентрирования энергии ультразвукового импульса в точке возбуждения, ограничивается базами прозвучивания 25..30 см в режиме излучения-приема импульса продольной волны. Если для типового метода контроля прочности бетона такая база может считаться приемлемой, то для регистрации эффектов акустической упругости бетона в натуральных условиях требуется значительно меньшая степень вариации оценки скорости акустического импульса, чем может быть обеспечено этим методом. Снижение вариации оценки скорости УЗ импульса возможно [82, 83] при увеличении базы прозвучивания до 1...2 метров. Реализовать измерения на таких базах возможно на основе волн Релея. Первостепенное значение имеют энергетические показатели тракта излучение-прием. Ниже приведены данные моделирования и данные натуральных ультразвуковых испытаний.

На рис. 7.2 показаны временные диаграммы импульсных процессов в плоскости перпендикулярной поверхности модели в направлении распространения волны, на расстоянии 150 мм от точки возбуждения.



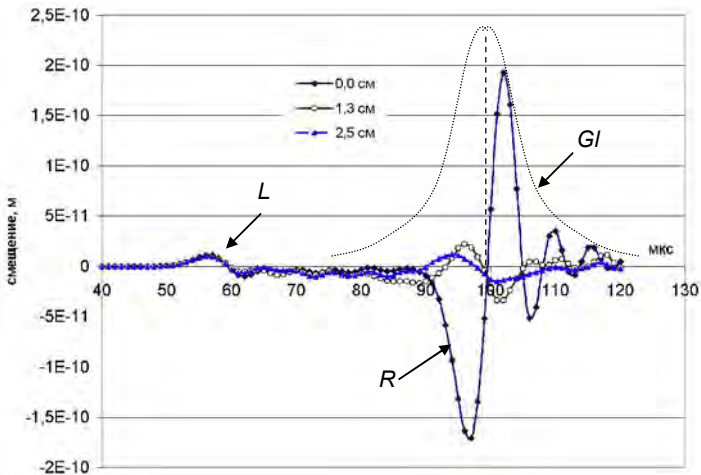


Рис. 7.2 – Временные диаграммы импульсов смещения узлов КЭ модели в направлении нормальном к поверхности в точках на расстоянии 150 мм от точки возбуждения нормальным к поверхности импульсом: *L* – импульс инициированный продольной подповерхностной волной; *R* – импульс волны Релея; *GI* – колоколообразная огибающая импульса волны Релея; длительность инициирующего полусинусоидального импульса давления – 7 мкс

Обозначению *L* соответствует импульс продольной волны, первое вступление импульса волны Релея обозначено *R*. Первое вступление этого типа колебаний, обусловленное волной Релея, имеет фазу противоположную фазе импульса продольной волны и достигает в амплитуде  $1,7 \cdot 10^{-10}$  м, что более, чем на порядок превышает уровень первого вступления продольной волны –  $1 \cdot 10^{-11}$  м. Ярко выражена поверхностная локализация волны Релея – на глубине 1,3 см наблюдается (рис. 7.2) снижение ее интенсивности и изменение фазы колебаний.

Принимая во внимание, что импульс продольной волны существующих ультразвуковых приборов надежно регистрируется на расстоянии 15...25 см от точки возбуждения и то, что затухание мощности волны Релея прямо пропорционально расстоянию от точки возбуждения, можно рассчитывать, что ее импульс будет надежно регистрироваться обычными приборами ультразвукового контроля на расстоянии порядка 1,5...2 м от точки возбуждения.

Для проверки возможности регистрации импульса поверхностной волны и оценки метрологических показателей методики измерений была выполнена серия ультразвуковых измерений на натурном крупноразмерном образце. На рис. 7.3 приведен общий вид испытательного образца и использованное оборудование, на рис. 7.4 и в табл. 7.1 - характеристические размеры образца.

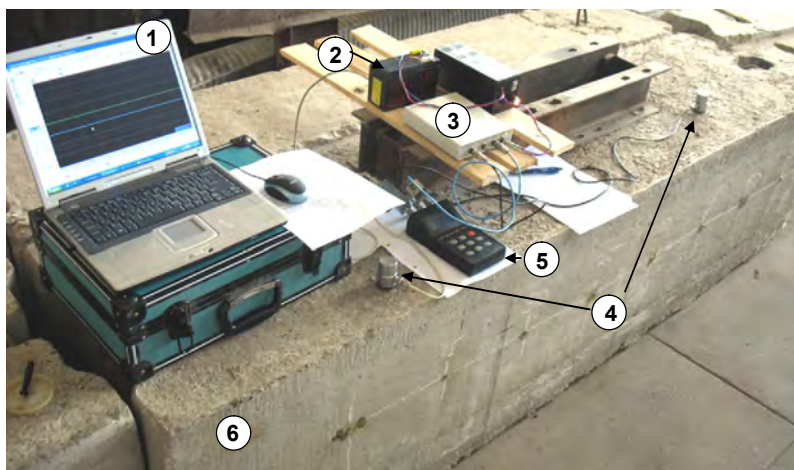


Рис. 7.3 – Используемое измерительное оборудование:  
 1 – Notebook с программой регистрации акустических сигналов;  
 2 – аккумулятор источника питания АЦП; 3 – аналого-цифровой преобразователь (цифровой осциллограф) В-421; 4 – излучающий и приемный ЭАП;  
 5 – измеритель времени распространения ультразвукового импульса «Пульсар-1.2» с разветвителем сигналов; 6 - Испытательный бетонный образец с разметкой точек установки ЭАП

Таблица 7.1 – Характеристические размеры образца

Характеристический размер, м	
А	2,36-2,38
В	0,58-0,60
С	0,59-0,60
Х	0,39
У	0,23

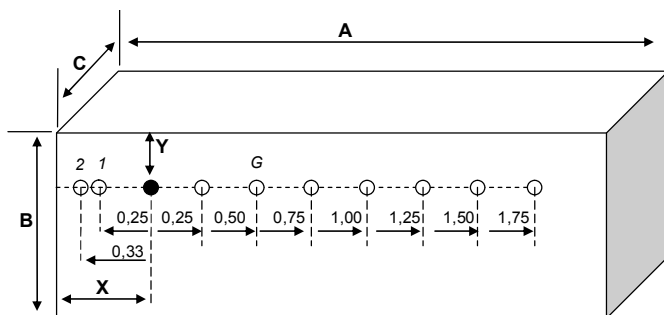


Рис. 7.4 – Схема установки ультразвуковых преобразователей на испытательном бетонном образце

Для оценки влияния на метрологические показатели типа акустического контакта измерения проводились тремя сериями, в каждой из которых менялся тип контакта ЭАП с поверхностью бетона. В серии ВВ оба преобразователя устанавливались без концентраторов через контактную смазку. В серии ВТ приемный ЭАП устанавливался через контактную смазку, излучающий – с сухим точечным контактом (СТК), с концентратором. В серии ТТ оба ЭАП использовались с СТК. Измерения в каждой серии производились при неизменной позиции приемного преобразователя в точке с координатами  $X, Y$ . Координата  $X$  излучателя менялась ступенчато с шагом 25 см. Минимальная база измерения составляла 25 см, максимальная -175 см. В испытаниях использовались оригинальные ЭАП разработки НИЛ ПГС с основной модой резонансной частоты 75 КГц.

На рис. 7.5 и 7.6 приведены временные диаграммы акустических сигналов на базах измерения 25 см и 175 см для серии ВВ. В приложении Г приведены временные диаграммы для всех серий измерений. В табл. 7.2, 7.3, 7.4 и табл. Г.1...Г.3 (см. прил. Г) приведены значения характеристических параметров акустических сигналов по каждой их серий измерений. Приведены результаты статистической обработки данных.

Сопоставляя диаграммы рис. 7.5, 7.1, 7.2 можно констатировать качественное сходство сигналов.

Главное их отличие заключается в значительной временной апертуре реальных акустических сигналов, обусловленной, главным образом, выраженным резонансным характером передаточной ха-

рактические характеристики приемного и излучающего ЭАП. Причем, судя по периодической смене фазы колебаний, хорошо заметной на диаграммах Г.2, Г.3, Г.7, Г.8 (см. прил. Г), передаточная частотная характеристика “излучающий ЭАП-бетон-приемный ЭАП” имеет несколько (не менее двух) резонансов. На диаграмме рис. 7.6 также отчетливо виден периодический поворот фазы первого вступления волны Релея по отношению к импульсу продольной волны.

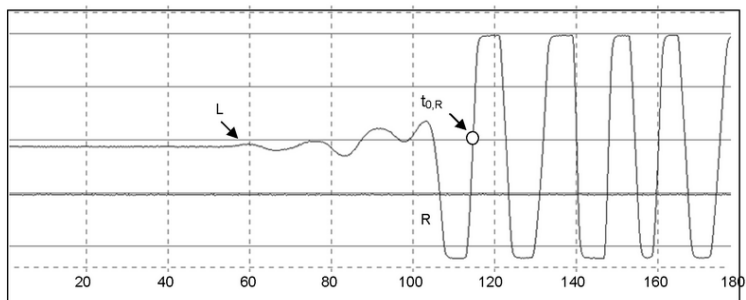


Рис. 7.5 – Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 25 см с использованием вязкого акустического контакта ЭАП: *L* – первое вступление подповерхностной продольной волны; *R* – первое вступление импульса волны Релея; горизонтальная координата соответствует оси времени, отметки – в микросекундах, вертикальная координата соответствует уровню сигнала предусилителя прибора «Пульсар-1.2», масштаб – 0,5 В/деление

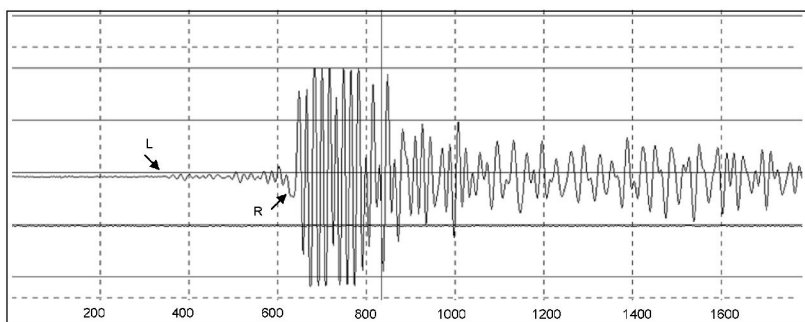


Рис. 7.6 – Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 175 см с использованием вязкого акустического контакта ЭАП: *L* – первое вступление подповерхностной продольной волны; *R* – первое вступление импульса волны Релея; горизонтальная координата соответствует оси времени, отметки – в микросекундах, вертикальная координата соответствует уровню сигнала предусилителя прибора «Пульсар-1.2», масштаб – 0,5 В/деление

Таблица 7.2 – Данные регистрации параметров акустических волн серии ВВ

База, см	$t_{0,L}$ , мкс	$\Delta t_{0,L}$ , мкс	$v_{d,L}$ , м/с	$\Delta v/v_L$	$t_{0,R}$ , мкс	$\Delta t_{0,R}$ , мкс	$v_{d,R}$ , м/с	$\Delta v/v_R$
25	56	56	4464	0,000	114,5	105	2381	0,002
50	110	54	4630	-0,037	220	105,5	2370	0,007
75	169	59	4237	0,051	326	106	2358	0,011
100	221	52	4808	-0,077	431	105	2381	0,002
125	284	63	3968	0,111	538	107	2336	0,021
150	338	54	4630	-0,037	641	103	2427	-0,017
175	392	54	4630	-0,037	743	102	2451	-0,027
К. вариации		0,072	<b>0,069</b>			0,013	<b>0,013</b>	
ср. знач.		56,0	4464,3			104,8	2385,8	
				<b>r =</b>	<b>0,705</b>			

$t_{0,L}$ ,  $t_{0,R}$  – моменты времени появления первого вступления импульса продольной подповерхностной волны и волны Релея ;

$\Delta t_{0,L}$ ,  $\Delta t_{0,R}$  – разница текущего и предшествовавшего значений времени распространения;

$v_{d,L}$ ,  $v_{d,R}$  – дифференциальная скорость импульса,  $v_{d} = \Delta t_0 / \Delta L$ , где  $\Delta L$  – шаг профилирования, для всех серий  $\Delta L = 0,25$  м;

Как и ожидалось, характерным для всех диаграмм является значительная амплитуда сигнала волны Релея. На диаграмме рис. 7.6 первое вступление импульса продольной подповерхностной волны полностью маскируется шумами приемного усилителя и визуально не регистрируется, импульс поверхностной волны фиксируется надежно. Это позволяет предположить, что для типовых составов конструкционного бетона измерительная база поверхностного прозвучивания может быть увеличена до 2...2,5 метров без потери точности оценки времени распространения импульса, и без необходимости применения алгоритмов накопления сигнала и его корреляционной обработки..

На диаграмме рис. 7.7 представлены значения относительного отклонения дифференциального значения скорости распространения ультразвукового импульса продольной подповерхностной волны и волны Релея

Следует отметить, что по данному показателю оценки скорости импульса волны Релея заметно превосходят оценки скорости продольной волны: коэффициент вариации скорости импульса волны Релея для серии ВВ равен 0,013, для продольной волны – 0,069. Сильная корреляция отклонений скорости импульсов ( $r = 0,705$ )

может указывать на то, что преобладающим фактором влияющим на вариацию скорости импульсов является вариация свойств бетона вдоль линии профилирования. Для серии ТВ (табл. 7.3) коэффициент корреляции уменьшается до 0,45 и меняет знак.

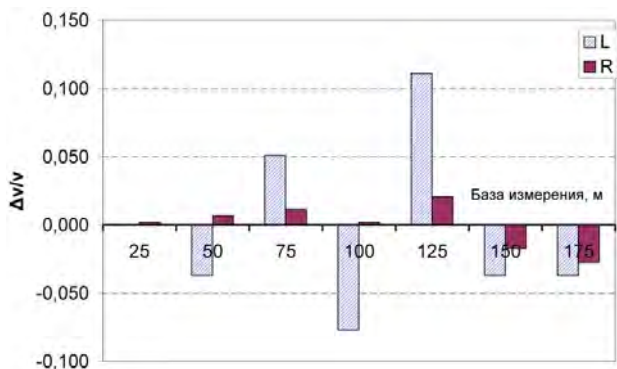


Рис. 7.7 - Зависимость вариации дифференциальной скорости УЗ импульса продольной волны и волны Релея от базы измерения для серии ВВ:  
L – для импульса продольной волны, R – для импульса волны Релея

Таблица 7.3 – Данные регистрации параметров акустических волн серии ТВ

База, см	$t_{0L}$ , мкс	$M_{0L}$ , мкс	$V_{0L}$ , м/с	$\Delta v/V_L$	$t_{0R}$ , мкс	$M_{0R}$ , мкс	$V_{0R}$ , м/с	$\Delta v/V_R$
25	65	56	4464	0,003	124	105	2381	0,005
50	123	58	4310	0,037	230	106	2358	0,015
75	178	55	4545	-0,016	335	105	2381	0,005
100	239	61	4098	0,084	442	107	2336	0,024
125	300*	61	4098	0,084	543	101	2475	-0,034
150	345*	45	5536	-0,241	650	107	2336	0,024
175	400**	55	4545	-0,016	750	100	2500	-0,044
К.вариации		0,106	0,121			0,021	0,022	
Ср.знач.		55,9	4475,7			104,4	2394,0	
				$r =$	-0,446			

\* - заметная неопределенность в оценке параметра из-за малого соотношения сигнал-шум;

\*\* - неоднозначность отсчета (принято меньшее значение).

Для серии ТВ преимущество волны Релея по показателю вариации дифференциального значения скорости сохраняется, хотя их соотношение снижается до двукратного.

Для серии ТТ корреляция практически отсутствует ( $r = 0,037$ ). Характерны «провалы» в регистрации первого вступления импульса продольной волны для базы, начиная с 0,75 м. При этом некоторые из зарегистрированных значений (табл. 7.4) имели значительную неопределенность и неоднозначность, что косвенно нашло отражение на оценках скорости распространения и показателях ее вариации. В то же время, несмотря на то, что импульс волны Релея регистрировался без затруднений, вариация его скорости возросла почти в три раза и достигла значения 0,036..



Рис. 7.8 – Зависимость вариации дифференциальной скорости УЗ импульса продольной волны и волны Релея от базы измерения для серии ТВ:  
L – для импульса продольной волны, R – для импульса волны Релея

Таблица 7.4 – Данные регистрации параметров акустических волн

База, см	$t_{0,L}$ - мкс	$M_{0,L}$ - мкс	$v_{дл.}$ - м/с	$\Delta v/v_L$	$t_{0,R}$ - мкс	$M_{0,R}$ - мкс	$v_{дл.}$ - м/с	$\Delta v/v_R$
25	74	56	4464	0,006	133	105	2381	-0,003
50	132	58	4310	0,040	238	105	2381	-0,003
75	190*	58	4310	0,040	347	109	2294	0,034
100	246*	56	4464	0,006	450	103	2427	-0,023
125	300**	54	4630	-0,031	550	100	2500	-0,053
150	352**	52	4808	-0,071	660	110	2273	0,042
175	***	***	***	***	762	102	2451	-0,033

К. вариации      0,042      0,043      0,035      0,036  
Ср. знач.      55,7      4491,0      105,3      2373,4  
 $r = 0,03712$

\* - заметная неопределенность в оценке параметра из-за малого соотношения сигнал-шум;

\*\* - неоднозначность отсчета (принято меньшее значение);

\*\*\* - отсутствие признаков сигнала

Отсутствие корреляции для показателя вариации скорости импульсов указанных типов волн может быть обусловлено преобладающим влиянием нестабильности сухого точечного акустического контакта ЭАП. В пользу данного предположения может свидетельствовать монотонный рост коэффициента вариации отклонений скорости по мере поэтапной замены ЭАП с вязким контактом на ЭАП с СТК.

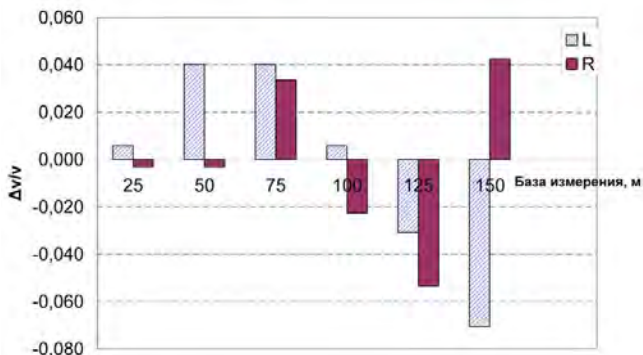


Рис. 7.9 – Зависимость вариации дифференциальной скорости УЗ импульса продольной волны и волны Релея от базы измерения для серии ТТ: *L* – для импульса продольной волны, *R* – для импульса волны Релея

### 7.3 Определение динамического коэффициента Пуассона

Взаимосвязь между динамическим коэффициентом Пуассона и скоростью распространения различных типов волн описывается дисперсионным уравнением [21], которое можно записать в виде

$$\zeta^6 - 8\zeta^4 + 8\zeta^2 \left( 3 - 2 \frac{V_T^2}{V_L^2} \right) - 16 \left( 1 - \frac{V_T^2}{V_L^2} \right) = 0; \quad (7.3)$$

где  $\zeta = V_R/V_T$ .

Принимая во внимание известные соотношения

$$V_L = \sqrt{\frac{E_o \cdot (1 - \nu_o)}{\rho \cdot (1 + \nu_o) \cdot (1 - 2\nu_o)}}; \quad (7.4)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E_o}{2\rho \cdot (1 + \nu_o)}}; \quad (7.5)$$

можем записать



$$\frac{V_L}{V_T} = \sqrt{\frac{1-2v_\partial}{2 \cdot (1-v_\partial)}}; \quad (7.6)$$

С учетом (7.6) уравнение (7.3) можно записать в виде

$$\zeta^6 - 8\zeta^4 + 8\zeta^2 \left( 3 - 2 \left[ \frac{(1-2v_\partial)}{2 \cdot (1-v_\partial)} \right] \right) - 16 \left( 1 - \left[ \frac{(1-2v_\partial)}{2 \cdot (1-v_\partial)} \right] \right) = 0. \quad (7.7)$$

Для параметра  $\zeta$  уравнение (7.7) имеет 6 корней. Для  $v_\partial$  в диапазоне  $0 \dots 0,2637$  все корни действительные и попарно сопряженные по знаку. В диапазоне  $0,2637 \dots 1$  остается одна пара действительных корней и две пары комплексных корней.

Анализ решений уравнения (7.7) целесообразно выполнить, принимая в качестве неизвестной величины параметр  $v_\partial$ , рассматривая его выражение в диапазоне действительных положительных значений параметра  $\zeta$ . В этом случае получим единственное значение  $v$  для всего диапазона значений  $\zeta$

$$v_\partial = \frac{\zeta^6 - 8\zeta^4 + 16\zeta^2 - 8}{\zeta^6 - 8\zeta^4 + 8\zeta^2}. \quad (7.8)$$

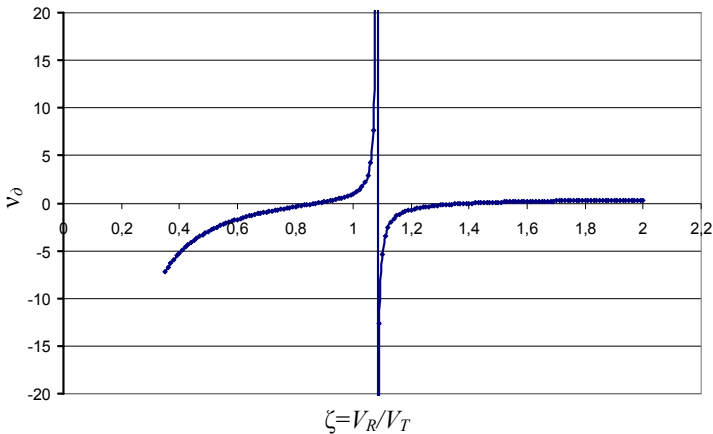


Рис. 7.10 – Зависимость коэффициента Пуассона от отношения скоростей волн Релея и поперечной объемной волны

На рис. 7.10 приведен график зависимости описываемой формулой (7.8) для диапазона значений  $\zeta$  от 0,35 до 2,0. На рис. 7.11 –

график зависимости  $\zeta=W(v_\delta)$  для диапазона  $v_\delta$  от 0 до 0,5 и аппроксимирующая эту зависимость рациональная функция, приведенная в [93]

$$v_\delta = \frac{0.875 + 1.125 \cdot \zeta^2}{1 + \zeta}. \quad (7.9)$$

Рассмотрим уравнение (7.7), выполнив подстановку

$$\zeta = \eta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - v_\delta)}{1 - 2v_\delta}}, \quad (7.10)$$

где  $\eta = V_R/V_L$ .

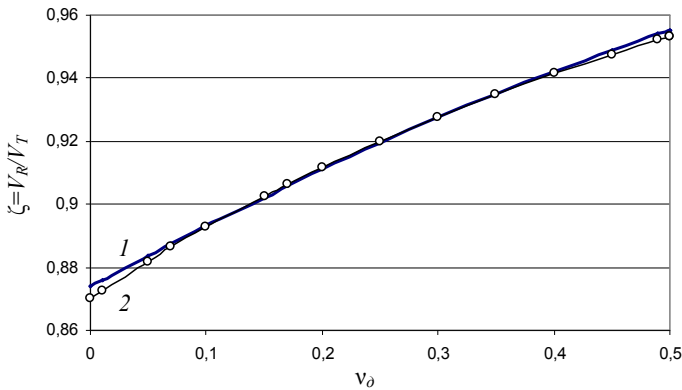


Рис. 7.11 – Зависимость отношения скоростей волн Релея и поперечной объемной волны от коэффициента Пуассона:  
1 – по формуле (7.8); 2 – по формуле (7.9)

Полученное уравнение

$$\left[ \eta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - v_\delta)}{1 - 2v_\delta}} \right]^6 - 8 \cdot \left[ \eta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - v_\delta)}{1 - 2v_\delta}} \right]^4 + 8 \cdot \left[ 3 - 2 \cdot \frac{(1 - 2v_\delta)}{2 \cdot (1 - v_\delta)} \right] \times \left[ \eta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - v_\delta)}{1 - 2v_\delta}} \right]^2 - 16 \cdot \left[ 1 - \frac{(1 - 2v_\delta)}{2 \cdot (1 - v_\delta)} \right] = 0 \quad (7.11)$$

имеет 4 корня для  $v_\delta$ , из которых только один является действительным. Ниже, в качестве примера, приведены решения уравнения (7.11) для  $\eta = 0,48$ , полученные в среде *MathCad*.

$$v_{\delta} = \begin{pmatrix} -2.71060683 \ 9478563695 \ 7 \\ 0.31859261 \ 3611644208 \ 78 \\ 0.47448917 \ 8674423402 \ 42 - 0.01632528 \ 2660833714 \ 262i \\ 0.47448917 \ 8674423402 \ 42 + 0.01632528 \ 2660833714 \ 262i \end{pmatrix}$$

Если в качестве переменной рассматривать величину  $\eta$ , то уравнение (7.11) будет иметь 6 корней. В диапазоне значений  $v_{\delta}$  от 0 до 0,5 имеется два действительных, сопряженных по знаку и четыре комплексных корня. В диапазоне значений  $v_{\delta}$  от 0,5 до 1,0 имеется два мнимых и четыре комплексных корня для  $\eta$ . Символьные, аналитические выражения для корней уравнения (7.11) слишком громоздки, - выражение только для одного корня занимает страницу. Поэтому для анализа результата удобнее использовать выражение, приближенно описывающее связь между  $v_{\delta}$  и  $\eta$ . На рис. 7.12 приведены графики зависимости  $v_{\delta} = F(\eta)$ . Кривая 1 соответствует положительным значениям  $\eta$ , кривые 2 и 3 соответствуют модулям мнимых корней для  $\eta$ .

Зависимость  $v_{\delta}$  от  $\eta$  хорошо аппроксимируется выражением вида

$$v_{\delta} = \frac{a + b \cdot \eta}{1 + c \cdot \eta + d \cdot \eta^2}, \quad (7.12)$$

где  $a = 0,50607613$ ;  $b = -0,817673$ ;  $c = -1,3740213$ ;  $d = 0,05049$ .

Выражение (7.12) может служить основой методики оперативно-го определения коэффициента Пуассона по данным поверхностного прозвучивание бетона. Для приблизительного расчета величины  $\eta$  через  $v$  можно использовать выражение

$$\eta = \frac{a + b \cdot v}{1 + c \cdot v + d \cdot v^2}, \quad (7.13)$$

где  $a = 0,624430$ ;  $b = -1,2414242$ ;  $c = -1,4965016$ ;  $d = -0,489795$ .

Остаточное среднее квадратическое отклонение  $S_{\eta}$  использованной аппроксимации составляет 0,0108, коэффициент корреляции  $r = 0,9987$ .

Для приведенных ниже значений скоростей распространения ультразвукового импульса  $V_L = 4130$  м/с,  $V_R = 2105$  м/с получим:  $\eta = V_R/V_L = 0,53$ ;  $v_{\delta} = 0,21$

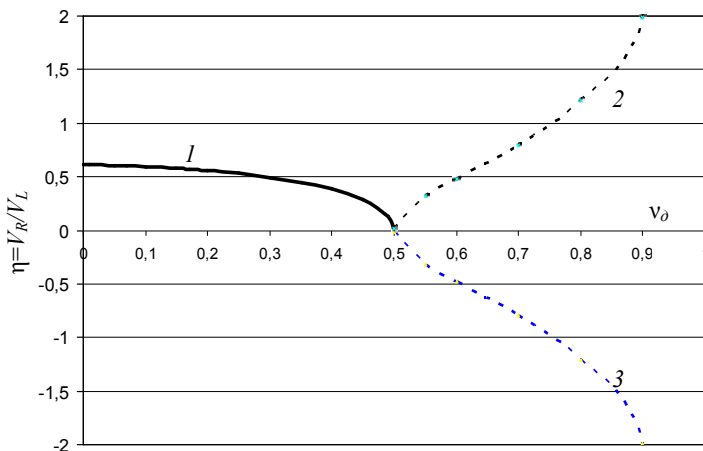


Рис. 7.12 – Зависимость отношения скоростей волн Релея и продольной объемной волны от коэффициента Пуассона:  
 1 – для области действительных значений коэффициента Пуассона (7.13);  
 2, 3 – модули комплексных значений

#### 7.4 Методика определения скорости распространения импульса поверхностной волны в крупноразмерных бетонных и железобетонных конструкциях

Основа методики состоит в селекции составляющих волнового процесса по амплитудному признаку. Если рассматривать только геометрический эффект рассеивания энергии волны, не принимая во внимание тепловые потери мощности и потери на рассеяние на неоднородностях и дефектах, то соотношение мощностей сигналов акустического импульса продольной подповерхностной волны описывается выражением

$$\frac{Q_{L,s2}}{Q_{L,s1}} = \left( \frac{s1}{s2} \right)^2, \quad (7.14)$$

где  $s1$  и  $s2$  – базы прозвучивания.

Для импульса волны Релея соотношение мощностей принимает вид

$$\frac{Q_{R,s2}}{Q_{R,s1}} = \frac{s1}{s2}. \quad (7.15)$$

Соответственно для амплитуд сигналов принятых импульсов справедливы выражения

$$A_{L,s2} = A_{L,s1} \frac{s1}{s2}, \quad (7.16)$$

$$A_{R,s2} = A_{R,s1} \sqrt{\frac{s1}{s2}}. \quad (7.17)$$

Из выражений (7.16) и (7.17) следует, что по мере увеличения базы измерения  $s$ , соотношение амплитуд импульсов волны Релея и продольной подповерхностной волны будет возрастать прямо пропорционально корню квадратному из относительной базы прозвучивания. Это означает, что определение скорости импульса волны Релея эффективно на больших базах прозвучивания, так как в этом случае сигнал волны Релея ее легко отличить от сигналов других типов волн: на рис. 7.1 видно, что амплитуда импульса волны Релея имеет 30-кратное превышение амплитуды импульса продольной волны. Кроме того, большая база позволяет если не устранить, то ослабить влияние на результат измерений реверберационных эффектов.

Важным является выбор методики регистрации отсчетного момента времени для соответствующих сигналов, по которому рассчитывается скорость распространения импульса. Типичной методикой для определения времени распространения импульса продольной волны является регистрация момента времени появления так называемого первого вступления сигнала, который соответствует моменту времени превышения сигналом установленного порогового значения. Обычно уровень порога устанавливают минимальным, близким к уровню шума приемного тракта. Данная методика достаточно просто реализуется измерительным трактом приборов контроля, хотя в действующих нормативах она не оговаривается. Для определения прочности бетона по указанным стандартам такая методика приемлема, поскольку для нее важно лишь соответствие косвенного параметра значению прочности, а любые несоответствия полученного косвенного параметра - отсчета времени распространения «истинному значению» будут скорректированы градуировочной зависимостью.

Для определения динамических модуля Юнга и коэффициента Пуассона степень соответствия полученного отсчета времени/скорости распространения акустического импульса «истинным значениям» имеет принципиальное значение. Бетону присуща частотная дисперсия акустического сигнала: разные частотные составляющие акустического сигнала имеют различия в затухании и времени/скорости распространения. Это создает известную метрологическую проблему, - каким образом производить оценку параметров принятого акустического сигнала? Критерием «правильности» той или иной методики может служить выполнение условия аддитивности результатов оценки времени распространения акустического сигнала: сумма времен распространения сигнала на малых базах должна совпадать с временем распространения на базе равной сумме малых баз. В гл. 4 показано, что с теоретических позиций эффективной может рассматриваться методика определения момента времени регистрации акустического сигнала в дисперсной среде по моменту достижения максимума огибающей сигнала. Практической реализации данного подхода к измерениям препятствует значительная нестабильность сухого точечного акустического контакта (СТК), используемого в современных ЭАП. Она проявляется в изменении характера реверберационного процесса в самих ЭАП, который интерферируя с сигналами отраженными от границ изделия создает сложную, изменчивую картину, внешне проявляющуюся в изменении формы сигнала приемного ЭАП. На рис. 7.13 представлены временные диаграммы ультразвуковых сигналов при различных усилиях контакта с поверхностью бетона и неизменной базе прозвучивания. Форма огибающей сигналов претерпевает значительные изменения. Сдвиг «перетяжек» к началу по мере увеличения усилия контакта указывает на изменение резонансных частот в системе. В то же время, на начальной части диаграммы каждого сигнала можно обнаружить участки, сохраняющие свою форму. На рис. 7.14 приведен фрагмент диаграмм рис. 7.13, соответствующий началу сигнала.

Момент начала сигналов определяется неустойчиво из-за накладывающихся остаточных колебаний сигнала продольной волны. В то же время форма отмеченного на рис. 7.13 участка сигналов сохраняется с точностью до масштабного (по вертикали) коэффициента.

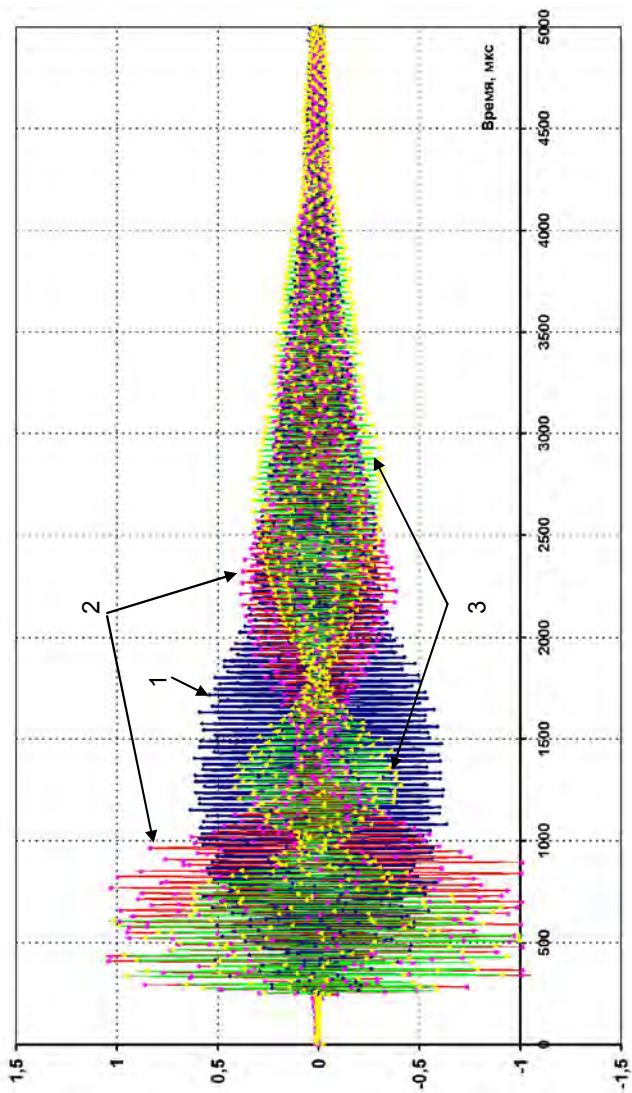


Рис. 7.13 – Временные диаграммы реверберационно-интерференционных процессов в системе ультразвуковых ЭАП с сухим точечным контактом при различных усилиях контакта с бетоном:  
 1 – сила контакта – 1кГс; 2 – 3-4кГс; 3 – 5-7кГс; база – 75 см

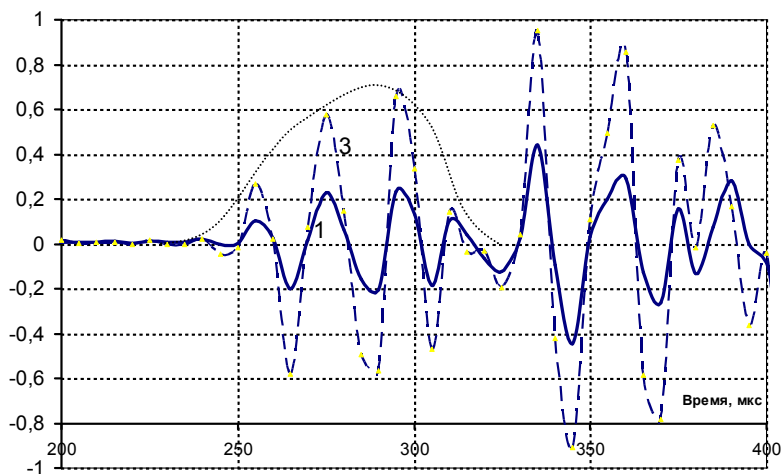


Рис. 7.14 – Фрагмент временных диаграмм реверберационных процессов в системе ультразвуковых ЭАП с сухим точечным контактом при различных усилиях контакта с бетоном: 1 – усилие контакта – 1кГс; 3 – 5...7кГс; база – 75 см

Представляет интерес сравнить амплитудные соотношения сигналов в пределах каждой из диаграмм, так и между диаграммами 1 и 3, и с образцовым сигналом корреляционного приема импульса (гл. 4) Амплитудные коэффициенты рассчитаны по формуле

$$K_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{A_{i,1}}, \quad (7.18)$$

где  $A_{i,j}$  – амплитуда  $j$ -го выброса  $i$ -й диаграммы (табл. 7.1).

Таблица 7.1 – Амплитудные коэффициенты

Номер выброса	1	2	3	4	5	6
Знак выброса	+	-	+	-	+	-
$K_{1,j}$	1	1,89	2,18	1,96	2,22	1,74
$K_{2,j}$	1	2,15	2,15	2,10	2,45	1,74
$K_{1,j} / K_{2,j}$	1	0,88	1,01	0,93	0,91	1

Из табл. 7.1 видно, что отношения амплитуд выбросов сигналов к амплитуде первого выброса сохраняются для обоих сигналов: от-



клонения не превышают 12%. Набор коэффициентов совместно с временными интервалами между вершинами амплитудных выбросов можно рассматривать как характеристические параметры образа зондирующего импульса, которые сохраняются при распространении импульса. Неизменность сигнального образа может служить косвенным подтверждением отсутствия интерференционных помех, например, от отраженных сигналов. На рис. 7.15 приведены диаграммы сигналов импульсов волн Релея для базы измерения 75 см и 83 см. Схема измерений и оборудование показаны на рис. 7.3 и 7.4.

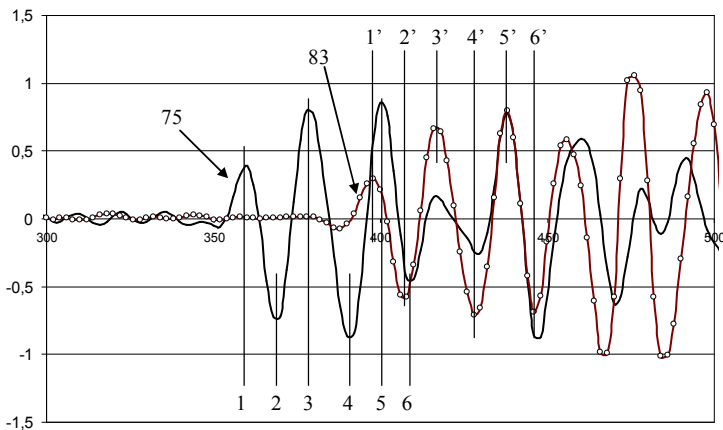


Рис. 7.15 – Временные диаграммы сигналов импульсов волн Релея на испытательном бетонном образце: для базы измерения 75 см и 83 см

Иницирующий импульс вводился в точку  $G$  (рис. 7.4), установка приемного преобразователя производилась в точках 1 и 2 бетонного образца; соответственно база измерения составляла 75 и 83 см. Точка 2 (рис. 7.4) выбрана на расстоянии 6 см от грани образца для наблюдения влияния на зондирующий сигнал эффекта отражения. В табл. 7.2 приведены данные испытаний: значения амплитудных коэффициентов акустических сигналов и их соотношения.

Таблица 7.2 – Оценки параметров импульсов волны Релея

Номер выброса	1, 1'	2, 2'	3, 3'	4, 4'	5, 5'	6, 6'
Знак выброса	+	-	+	-	+	-
$A_{75,J}$ (рис. 7), В	0,391	0,727	0,801	0,863	0,859	0,445
$A_{83,J}$ (рис. 7); В	0,297	0,578	0,664	0,707	0,801	0,688
$K_{75,J}$	1	1,86	2,02	2,21	2,20	1,14
$K_{83,J}$	1	1,95	2,23	2,38	2,70	2,25
$K_{75,J} / K_{83,J}$	1	0,954	0,906	0,929	0,815	0,507
$T_{75,J}$ , мкс	360	370	378	390	400	410
$T_{83,J}$ , мкс	398	408	416	428	438	446
$\Delta T_J = T_{83,J} - T_{75,J}$	38	38	38	38	38	36

### 7.5 Анализ данных испытаний

1. Отношения амплитудных коэффициентов для первых четырех амплитудных выбросов не отклоняется от единицы более чем на 7%.

2. Временные интервалы для одноименных выбросов устойчиво постоянны и равны 38 мкс, что соответствует скорости волны Релея

$$V_R = (0,83 - 0,75) / T_J = 0,08 / 38 \cdot 10^{-6} = 2105 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Отклонение амплитудного коэффициента от опорного значения ( $K_{i,5} = 2.45$ , табл. 7.1) наблюдается для выбросов 5 и 6, что позволяет предполагать присутствие интерференции зондирующего сигнала с его отражением от грани испытательного образца. Расчет времени задержки отраженного сигнала  $\tau_3$  для точки 2 (рис. 7.4) по формуле

$$\tau_3 = 2 \cdot (X - 0.33) / V_R.$$

После подстановки значений параметров имеем:

$$\tau_3 = 2 \cdot 6 \cdot 10^{-2} / 2105 = 0,12 / 2105 = 57 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Полученное значение совпадает (рис. 7.15) с временной отметкой начала пятого выброса сигнала на базе 83 см.

\* \* \*

Мультиволновой контроль позволяет улучшить метрологические показатели и повысить информативность ультразвукового метода прохождения при контроле физико-механических свойств бетона.

Практическое применение поверхностной волны для целей диагностики состояния бетонного массива возможно с использованием типовых ультразвуковых электроакустических преобразователей.

В основе методики селекции поверхностных акустических волн на базах прозвучивания бетона более 0,4...0,5 м может быть положено амплитудное разделение составляющих акустического сигнала, а также использование его корреляционной обработки

## ГЛАВА 8

### КОМБИНИРОВАНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ БЕТОНА

Используемые в настоящее время методы неразрушающего контроля бетона не являются равнозначными в оценках его упругих и прочностных характеристик, что обусловлено, в первую очередь, различием физических основ таких методов. Это обстоятельство позволяет говорить о селективной чувствительности того или иного неразрушающего метода к контролируемым физико-механическим параметрам бетона, и открывает возможность повышения точности и достоверности контроля путем использования системы нескольких неразрушающих методов. Особую актуальность эти вопросы приобретает в условиях монолитного строительства, где учет факторов, приводящих к снижению прочности бетона, затруднен как по причинам технического и технологического характера, так и вследствие проявления так называемого «человеческого фактора». Повышение надежности определения прочности бетона на основе комплексного, взаимодополняющего учета оценок нескольких методов контроля отмечалось рядом исследователей [25, 29, 68, 78, 88, 113, 120, 121], но степень методической проработки данного вопроса, на наш взгляд, пока остается недостаточной для практического использования.

Под комбинированным контролем обычно понимается многопараметровый контроль, объединяющий данные нескольких, физически различающихся методов испытаний. Результатом является общая оценка контролируемого параметра. Исходным пунктом решения задачи комбинирования (объединения) оценок нескольких неразрушающих методов испытаний бетона является подбор методов, обладающих свойством *комплементарности* [83, 85], что выражается во взаимной компенсации некоторых погрешностей и повышению точности и достоверности результата. При этом подбор методов может производиться с различных позиций.

Попытки объединения в комплекс пары ультразвуковой импульсный метод – метод упругого отскока с использованием указанной выше методики набора массива точек в координатах  $V, R, f_c$  (соответственно: скорость ультразвукового импульса, индекс отскока, прочность бетона образца при одноосном сжатии) – так назы-

ваемый *SonReb* метод [117, 120, 121], делались неоднократно. В табл. 8.1 приведены варианты таких зависимостей. Представленное многообразие зависимостей свидетельствует о значительной неопределенности результата. Поэтому, несмотря на лучшую статистику результатов оценки прочности бетона в сравнении с каждым из методов в отдельности, *SonReb* метод не введен в стандарты Евросоюза.

### 8.1 Аддитивный алгоритм комбинирования

Другой подход основан на объединении не косвенных параметров методов, а полученных каждым методом оценок прочности бетона. Методически объединение может базироваться:

- на основе статистического анализа массива экспериментальных данных испытаний одних и тех же образцов бетона разными методами при достаточно широком спектре факторов вариации прочности, анализируя результаты испытания образцов на предмет их корреляции;

- на основе анализа физики процессов, лежащих в основе измерений прочности бетона, уточняя характер влияния переменных факторов на косвенные параметры рассматриваемых методов испытаний, включая в комплекс те методы, у которых чувствительность к переменным факторам разного знака;

Обе методики к образованию комплекса приводят в итоге к одинаковой форме объединения – с использованием весовых коэффициентов, - так называемому аддитивному объединению (см. рис. 8.1) вида

$$f_{c,j} = \frac{\sum_j (\mu_j \cdot f_{c,j})}{\sum_j \mu_j} = \sum_j (\omega_j \cdot f_{c,j}), \quad (8.1)$$

где  $f_{c,j}$  – оценка прочности бетона  $j$ -м методом;  $\mu_j$  – весовой коэффициент  $j$ -го метода.

Таблица 8.1

Single-variable equations			
1	$fc = 21.575 \times L - 72.276$	fc[MPa], L[cm]	NDT Windsor Sys. Inc.(1994) 3.7813
2	$fc = 1.2 \times 10^{-5} \times V^{1.7447}$	fc[MPa], V[km/s]	Kheder 1 (1998) 6.0974
3	$fc = 0.4030 \times R^{1.2083}$	fc[MPa]	Kheder 2 (1998) 2.1651
4	$fc = 36.72 \times V - 129.077$	fc[MPa], V[km/s]	Quasrawi 1 (2000) 3.6981
5	$fc = 1.353 \times R - 17.393$	fc[MPa]	Quasrawi 1 (2000) 2.8152
6	$fc = -5333 + 5385 \times L$	fc[MPa], L[in]	Malhotra <i>et al.</i> 2.2128
Multi-variable equations			
7	$c = -25.568 + 0.000635 \times R^3 + 8.397V$	fc[MPa], V[km/s]	Bellander (1979) 2.2128
8	$fc = -24.668 + 1.427 \times R + 0.0294V^4$	fc[MPa], V[km/s]	Meynink <i>et al.</i> (1979) 7.0654
9	$fc = 0745 \times R + 0.951 \times V - 0.544$	fc[MPa], V[m/s]	Tanigawa <i>et al.</i> 2.1000
10	$fc = [R/(18.6 + 0.019 \times R + 0.515 \times V)]$	fc[kg/cm <sup>2</sup> ], V[km/s]	Postacioglu (1985) 3.7617
11	$11 fc = 18.6 \times e^{0.019 \times R + 0.515V}$	fc[kg/cm <sup>2</sup> ], V[km/s]	Arioglu <i>et al.</i> (1991) 2.9205
12	$fc = 10^{3.119} \sqrt{\log R^3 \times V^4}^{-5.890}$	fc[kg/cm <sup>2</sup> ], V[km/s]	Arioglu <i>et al.</i> (1994) 4.2305
13	$fc = -39.570 + 1.532 \times R + 5.0.614 \times V$	fc[kg/cm <sup>2</sup> ], V[km/s]	Raymar <i>et al.</i> (1996) 7.5910
14	$fc = 0.00153 \times (R^3 \times V^4)^{0.611}$	fc[kg/cm <sup>2</sup> ], V[km/s]	Arioglu <i>et al.</i> (1996) 11.1623
15	$fc = 0.0158 \times V^{0.4554} \times R^{1.1171}$	fc[kg/cm <sup>2</sup> ], V[km/s]	Kheder 3 (1998) 2.1375

Трудности определения весовых коэффициентов на основе репрезентативного массива данных испытаний заключаются не только в проведении большого объема экспериментальной работы, но и в необходимости учета неисключенных систематических погрешностей, которые должны рассматриваться как случайные величины и могут быть представлены соответствующими многомерными законами распределений. Объем испытаний – количество совместных измерений контролируемого параметра  $M$  – будет определяться по формуле

$$M = i \cdot j, \quad (8.2)$$

где  $i$  и  $j$  – количество испытаний при построении градуировочных зависимостей для каждого из методов в отдельности.

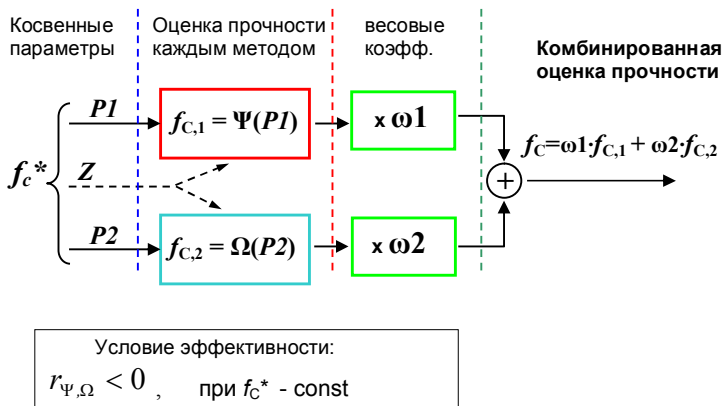


Рис. 8.1 – Алгоритм аддитивного объединения оценок прочности 2-х методов испытаний

Ориентировочная оценка  $M$  может быть выполнена исходя из типичных требований действующих нормативов [11] и [13], в соответствии с которыми количество образцов для испытаний берется не менее 30. Проведение процедуры комплексирования потребует порядка  $30^2 = 900$  испытаний каждым из методов и столько же пресовых испытаний, что выглядит проблематичным при внедрении комплексного метода в практику контроля.

Отдельные составляющие погрешностей могут быть коррелированы между собой. Эти связи между суммируемыми составляющими погрешности должны быть учтены. Среднее квадратическое отклонение двух коррелированных оценок прочности бетона определяется выражением

$$\sigma_k = \sqrt{\sigma_1^2 + 2r\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}$$

$$r = \frac{1}{n} \frac{\sum (f_{c1,i} - \bar{f}_{c1})(f_{c2,i} - \bar{f}_{c2})}{\sigma_1 \cdot \sigma_2}, \quad (8.3)$$

где  $r$  – коэффициент корреляции;  $\sigma_1, \sigma_2$  – среднее квадратическое отклонение оценок прочности бетона соответствующим методом.

Если величины  $f_{c1}$  и  $f_{c2}$  не коррелированы, то  $r = 0$  и

$$\sigma_k = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (8.4)$$

если величины  $f_{c1}$  и  $f_{c2}$  связаны линейной зависимостью, то  $r = \pm 1$  и

$$\sigma_k = \left| \sigma_1 \pm \sigma_2 \right|. \quad (8.5)$$

Очевидно, что критерием для отбора комплексобразующих методов может явиться отрицательное значение коэффициента корреляции  $r$ . В этом случае комплексная оценка прочности (или иного параметра) бетона будет иметь меньшую неопределенность, чем оценка каждого из методов в отдельности.

Практической альтернативой *SonReb* методу является разработанный НИЛ ПГС кафедры «Технология строительного производства» БНТУ [83] комплексный метод использующий объединение оценок прочности каждого из методов, а не их косвенные параметры, что упрощает методику его реализации, так как базируется на стандартных неразрушающих методах и не требует внесения изменений, лишь дополняет дополнительной расчетной процедурой по формуле (8.1). Разработка внедрена в 2005...2008 годах на уровне методических рекомендаций, а в 2014 году введена в стандарт предприятия «Контроль прочности бетона в строящихся и эксплуатируемых зданиях и сооружениях ультразвуковым методом».



### Основа методики комбинирования

Для бетона, рассматривая его как изотропную, квазиоднородную, упругопластичную среду, зависимость показаний прибора метода упругого отскока - индекса отскока бойка  $h$ , в первом приближении может быть представлена в следующем виде [83]

$$h = \psi \frac{\sigma_d^{5/4}}{E_d^*} + h_0, \quad (8.6)$$

где  $\sigma_d$  – динамический предел прочности материала;  $E_d^*$  – приведенный динамический модуль упругости системы «испытываемый материал – индентор»,  $\psi$  и  $h_0$  – коэффициенты, зависящие от физических и конструктивных параметров ударного механизма склерометра: энергии удара, массы индентора и др.

Зависимость (8.6) получена на основании анализа физической модели идеализированной системы “индентор – бетон” и не учитывает ряда факторов, характерных для реального процесса измерения: нелинейного характера зависимости «напряжение – деформация» бетона, его вязкие свойства, трение индентора в области контакта, конструктивные особенности механизма индентирования. Но она наглядно демонстрирует различие в характере влияния параметров прочности и упругости бетона на косвенный параметр  $h$ : рост модуля упругости бетона приводит к снижению индекса отскока, в противоположность влиянию прочности. Важным является так же то обстоятельство, что изменение плотности бетона не влияет на косвенный параметр метода.

В принципе, неоднозначность в оценке прочности бетона методом упругого отскока по формуле (8.6) может быть устранена некоторыми методическими приемами [85, 93], например методикой повторных измерений в одной и той же точке контакта с поверхностью бетона (см. гл. 2). Но практическое использование этой методики затруднено неприспособленностью к ней существующих конструкции молотков Шмидта.

Другим недостатком метода упругого отскока является малый объем бетона подвергающегося пластической деформации в зоне контакта. По оценкам [26] радиус пластической зоны составляет 1,1...1,2 диаметра отпечатка, что для молотка Шмидта типа  $N$  составляет

3...9 мм, для прибора ИПС-МГ4 – 2...5 мм. То есть, «глубина проникновения» в бетон для данного метода не достигает и 10 мм.

Акустические методы, в частности, ультразвуковой импульсный, в значительной мере свободны от этого недостатка. Даже при использовании поверхностного «прозвучивания» конструкции на постоянной базе измерения 12...15 см, толщина поверхностного слоя бетона, влияющего на распространения упругой волны, составляет 3...4 см. Основным косвенным параметром ультразвукового метода испытаний при определении прочности бетона является скорость (время) [13] распространения импульса ультразвуковых колебаний (УЗК), несмотря на доказанную эффективность использования в качестве информационных параметров других акустических характеристик, включая характеристики частотного спектра акустического сигнала, его затухания и др. Отказ от использования в практике неразрушающего контроля бетона расширенного перечня его акустических параметров связан, главным образом, с техническими проблемами при их измерении в построечных условиях.

Скорость распространения УЗК в бетонном массиве определяется его упругими свойствами, в соответствии с формулами классической акустики:

$$c_1 = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \approx 0,61 \cdot c_l, \quad (8.7)$$

где  $c_l$ ,  $c_t$  – скорости распространения продольной и поперечной упругих волн в массиве;  $\rho$  – плотность материала;  $E$ ,  $\nu$  – динамические модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно.

Из приведенных зависимостей (8.6) и (8.7) видны различия в чувствительности рассмотренных методов контроля к параметрам упругости бетона и его прочности, что дает основание предположить возможность искусственного «обострения» чувствительности к тому или иному физико-механическому параметру бетона на основе системы (метода) объединения оценок отдельных методов контроля. Алгоритм разработанного авторами комплексного метода оценки прочности бетона  $f_{c,complex}$  базируется на коррекции данных метода упругого отскока по СТБ 2264-2012 и ГОСТ 22690-88 [11], которые принимаются за опорные, поправкой, являющейся функцией разницы оценок прочности бетона ультразвуковым импульсным

методом по ГОСТ 17624-2012 [13] и опорного метода, в соответствии с формулой:

$$f_{c,complex} = f_{c,bas} + \delta(\Delta f_c), \quad (8.8)$$

где  $\Delta f_c = f_{c,add} - f_{c,bas}$ ;  $f_{c,bas}$ ,  $f_{c,add}$  – оценки прочности бетона опорным (базовым) и дополнительным методами соответственно. Практически, поправочную функцию  $\delta$  можно аппроксимировать линейной зависимостью вида:

$$\delta(\Delta f_c) = \frac{k \cdot \Delta f_c}{1 + k},$$

где  $k$  – коэффициент, рассчитываемый по формуле:

$$k = \frac{df_{c,bas}}{df_{c,add}}, \quad (8.9)$$

Значение коэффициента  $k$  для используемой пары методов зависит от технологии бетона и его возраста, и изменяется в пределах от 0,2...0,25 - для бетона монолитных конструкций возраста 1..2 суток, до 0,6...0,75 – для бетона возрастом более 14 суток. На рис. 8.2 приведены зависимости коэффициента  $k$  от прочности бетона. График 1 на рис. 8.2 построен по данным расчета коэффициента  $k$  исходя из формул (8.6), (8.7) и использовании в качестве градуировочной зависимости для ультразвукового импульсного метода выражения вида:  $f_{c,us} = A \cdot c_l^4$ , где  $c_l$  – скорость УЗК,  $A$  – коэффициент. Полуценное выражение для  $k$  имеет вид:

$$k = \frac{df_{c,Sh}}{df_{c,us}} = \frac{4}{5} \frac{f_{c,Sh} \cdot \rho^2 (1 - 2\nu_c)^2}{2A \cdot E_c^{*2} \left( \frac{E_c^*}{E_I^*} + 1 \right) (1 - \nu_c)^4}, \quad (8.10)$$

где  $f_{c,Sh}$ ,  $f_{c,us}$  – соответственно, оценки прочности бетона склерометром Шмидта и ультразвуковым методом;  $E_c^*$  – приведенный модуль упругости бетона;  $\nu_c$  - коэффициент Пуассона бетона;  $E_I^*$  – приведенный модуль упругости индентора.

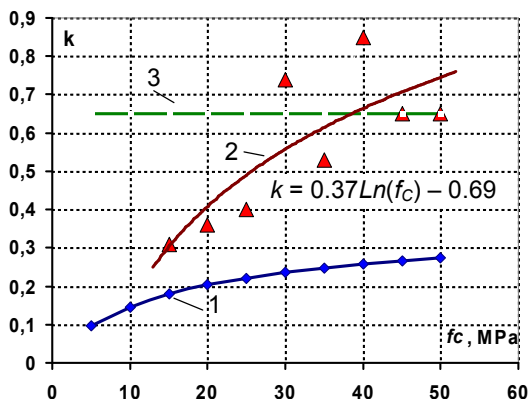


Рис. 8.2 – Зависимость коэффициента  $k$  от прочности бетона:  
 1 – по формуле (8.10); 2 – по экспериментальным данным; 3 – по формуле (8.12)

Экспериментальная оценка коэффициента  $k$  была выполнена по данным испытаний массива бетонных образцов (54 шт.), у которых вариация прочности и параметров упругости достигалась по мере их твердения в нормальных условиях, а также, для отдельной группы образцов, - изменением их водонасыщения. График 2 отображает результаты определения  $k$  на основе экспериментально полученной регрессионной зависимости, связывающей оценки прочности бетона двух используемых методов контроля:

$$f_{c,us} = a_0 + a_1 \cdot f_{c,sh}, \quad (8.11)$$

где  $a_0$  и  $a_1$  – коэффициенты

В этом случае значение  $k$  рассчитывалось по формуле:

$$k = -1/a_1.$$

Коэффициент  $k$  может определяться в качестве весового, рассматривая комплексную оценку прочности бетона как результат совместных неравноточных измерений прочности бетона методом упругого отскока и ультразвуковым импульсным методом. В этом случае  $k$  определяется как отношение дисперсий оценок прочности методами, составляющими комплекс:

$$k = s_{sh}^2/s_{us}^2, \quad (8.12)$$

где  $s_{sh}^2$ ,  $s_{us}^2$  - дисперсии оценок прочности методом упругого отскока (Шмидта) и ультразвуковым импульсным методом соответственно.

Указанный подход, не учитывает физической основы методов, рассматривая их оценки прочности бетона как статистически независимые. График 3 на рис. 1 отображает этот вариант определения  $k$ . Дисперсии оценок прочности бетона рассчитывались по данным градуировочных испытаний.

Значительную разницу значений коэффициента  $k$ , определенных на основе формализации описания физики процессов измерения прочности бетона, и на основе данных экспериментов можно объяснить следствием ряда допущений, использованных при выводе формулы (8.6), а также большей чувствительностью ультразвукового метода к изменению прочности бетона, чем это следует из (8.7) и связи модуля упругости бетона с его прочностью.

Спецификой ультразвукового импульсного метода определения прочности бетона в ранних сроках твердения является необходимость учета его возраста. Учитывать эволюцию градуировочных зависимостей для бетонов классов С25/30...С35/45 конструкций, твердевших при температуре воздуха +5...+25°C возможно введением поправочных коэффициентов, что подтвердили проведенные исследования [79, 82] на бетонных образцах-кубах и железобетонных конструкциях в построечных условиях. В отличие от ультразвукового метода, метод упругого отскока для бетонов указанных выше классов такой коррекции не требует. Возникающая при этом дополнительная систематическая погрешность в определении прочности бетона не превышает 3...4%. Указанное обстоятельство позволяет при выполнении градуировочных испытаний для метода упругого отскока использовать в качестве фактора вариации прочности бетонных образцов срок их твердения, что по сравнению с методикой ГОСТ 10180-90 [18] и ГОСТ 22690-88 [16] заметно упрощает процедуру подготовки образцов, так как все они могут быть изготовлены из используемой в производстве бетонной смеси.

#### *Сравнение показателей точности неразрушающих методов контроля прочности бетона*

Рассматриваемый комплексный метод был использован при оценке прочности возводимых монолитных конструкций спортив-

ного комплекса «Минск-Арена» и ряда высотных зданий с монолитным железобетонным каркасом в г.Минске. На рис. 8.3 приведены данные испытаний бетона монолитных колонн, имеющих близкие сроки набора прочности, неразрушающими методами, включая метод отрыва со скалыванием (ОМШ-1), ультразвуковой импульсный метод (УЗ), метод ударного импульса (ИПС-МГ4) и описанный выше комплексный методом с объединением оценок прочности по формуле

$$f_{is,I} = \frac{f_{is,1} + \theta \cdot f_{is,2}}{1 + \theta}, \quad (8.13)$$

где  $f_{is,1}$  и  $f_{is,2}$  – оценки прочности бетона конструкции методами образующими комбинированный метод;  $\theta$  – относительный коэффициент влияния (см. таб. 8.2).

Таблица 8.2 – Значения относительного коэффициента влияния  $\theta$  для бетона классов С25/30..С35/45

Срок твердения бетона $t_H$ , сутки	$1 \leq t_H < 2$	$2 \leq t_H < 4$	$4 \leq t_H < 7$	$7 \leq t_H < 28$	$28 \leq t_H$
$\theta$	3.5	2.4	1.9	1.5	1.35

Ордината гистограмм соответствует разнице оценок прочности бетона колонн методом отрыва со скалыванием  $f_{c,СКОЛ}$  и соответствующим неразрушающим методом  $f_{c,I}$ , то есть:  $\Delta f_{c,I} = f_{c,СКОЛ} - f_{c,I}$ ; индексы горизонтальной оси графика соответствуют условным номерам колонн.

Для первых двух методов испытаний использовались градуировочные зависимости «косвенный параметр – прочность бетона», полученные стандартной методикой совместных с прессовыми испытаний образцов-кубов; данные метода ударного импульса (прибор ИПС-МГ4.01) корректировались поправочной функцией вида:  $f_{c,ИПС} = 29,3 \cdot \ln(f_{c,basic}) - 57,9$ , МПа; где  $f_{c,basic}$  – оценка прочности бетона, полученная с использованием базовой градуировки прибора,  $f_{c,ИПС}$  – оценка прочности бетона с учетом коррекции.

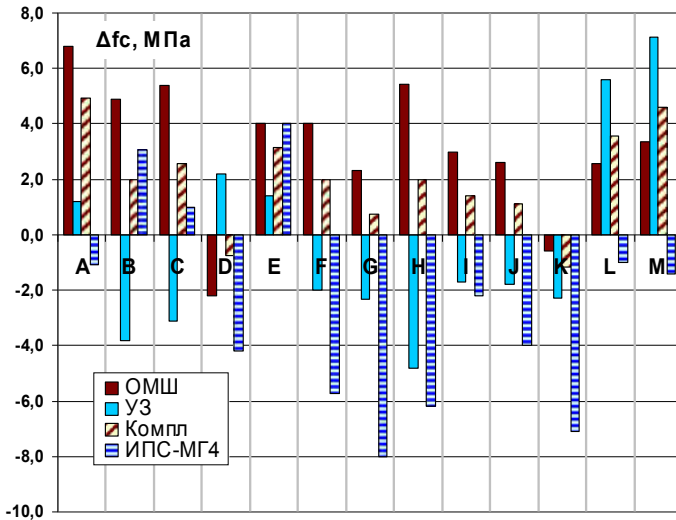


Рис. 8.3 – Разница оценок прочности бетона монолитных колонн 500х500 мм (группа I) методом отрыва со скалыванием и неразрушающими методами; (объект «Минск – Арена», бетон проектного класса С35/45, срок твердения – 115...140 суток)

Среднее значение прочности бетона  $f_{cm,SKOL}$  данной группы колонн по данным метода отрыва со скалыванием составило 45,2 МПа, при коэффициенте вариации  $V_c = 10,8\%$ . Заметно смещение от нуля средних значений отклонений  $\Delta f_c$  каждого из неразрушающих методов для всей группы колонн, что свидетельствует о некотором несоответствии использованных градуировочных зависимостей фактическим соотношениям прочности бетона и косвенных параметров неразрушающих методов. В большей мере это проявилось в оценках механических методов испытаний, что указывает на возможное отличие (снижение) прочности поверхностного слоя бетона конструкции от прочности подповерхностных областей.

На рис. 8.4 представлены данные испытаний другой группы монолитных колонн с использованием скорректированных градуировочных зависимостей. Здесь же представлены данные испытаний контрольных образцов-кубов

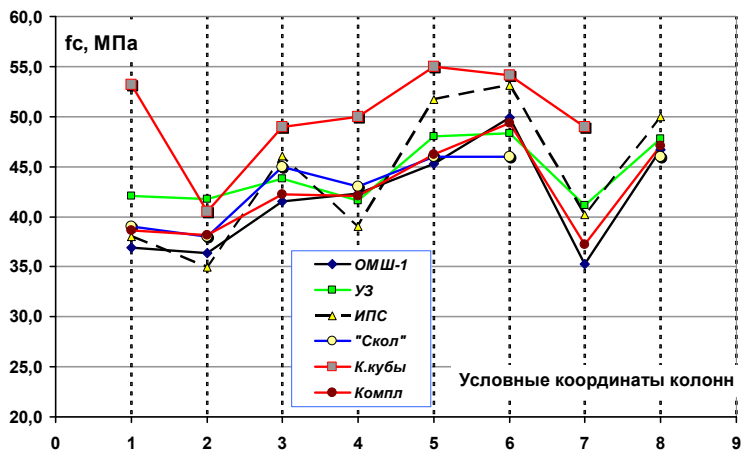


Рис. 8.4 – Оценки прочности бетона монолитных колонн 500x500 мм (группа II) неразрушающими методами; (объект «Минск – Арена», бетон проектного класса С35/45, срок твердения – 110...115 сут.)

Данные всех использованных неразрушающих методов хорошо коррелируют с данными других методов и, в частности, - данными метода отрыва со скалыванием. Систематическая составляющая погрешности измерения прочности составила для второй группы колонн +1,3 МПа – для метода упругого отскока, - 1,2 МПа – для ультразвукового метода, +1,3 МПа – для прибора ИПС-МГ4 и +0,5 МПа – для комплексного метода. Оценка систематической погрешности производилась только для колонн, которые подвергались испытаниям методом отрыва со скалыванием. Особого внимания заслуживает наблюдающееся устойчивое различие оценок прочности бетона колонн для всех использованных методов и результатов испытаний контрольных образцов-кубов, достигающее в отдельных случаях 25%...30%.

В таблице 8.3 приведены статистические параметры данных двух испытанных групп колонн.



Таблица 8.3 – Показатели погрешности оценки прочности бетона монолитных колонн неразрушающими методами

Тип прибора	Группа колонн I			Группа колонн II		
	$S_{Tm}/f_{cm,SKOЛ}$	Коэфф. коррел. r	Ср. прочность для группы $f_{cm}$ , МПа	$S_{Tm}/f_{cm,SKOЛ}$	Коэфф. коррел. r	Ср. прочность для группы $f_{cm}$ , МПа
ОМШ-1	12,4*7,7	0,92	42,0	8,0	0,96	42,9
УК1401	10,8*9,6	0,85	46,2	9,2	0,87	44,8
комплекс ОМШ-УК	8,1*5,3	0,95	43,7	4,4	0,96	43,3
ИПС-МГ4	12,9*10,1	0,93	47,8	8,5	0,91	45,7
«Скол-МГ4»	0	1	45,2	0	1	43,9
Контр. образцы	-	0,81	50,9	-	0,63	51,4

$S_{Tm}$  – среднее значение остаточного среднего квадратического отклонения оценок прочности бетона группы колонн неразрушающим методом (в качестве базового метода контроля рассматривался метод отрыва со скалыванием);

\* - данные получены без коррекции градуировочных зависимостей методов

Как следует из табл. 8.3, наименьший разброс оценок (показатель  $S_{Tm}/f_{cm,SKOЛ}$ ) обеспечивается совместным использованием методов упругого отскока и ультразвукового импульсного. Очевидно, что полученный результат не мог быть достигнут в случае отсутствия взаимной корреляции погрешностей оценок прочности бетона этих методов. Если рассматривать результат комплексной оценки прочности как среднее арифметическое двух статистически независимых и равнозначных оценок, то, в первом приближении, случайная составляющая результата должна уменьшиться в  $2^{-0,5}$  раза. Фактическое же уменьшение погрешности достигает двух раз, а иногда и более, что позволяет рассматриваться это обстоятельство как довод в пользу использования комплекса «ультразвуковой метод – метод упругого отскока», и адекватности рассматриваемой (8.6) физической модели процесса индентирования бетона. Данные метода ударного импульса (прибор ИПС-МГ4) показали большую, чем у молотка Шмидта подверженность влиянию качества поверхности испытуемого изделия. Использовать прибор ИПС-МГ4 на неподготовленной бетонной поверхности плит перекрытия не удавалось вовсе, показания молотка Шмидта в таких случаях оказывались заметно более ус-

тойчивыми, хотя и сильно заниженными. К указанной причине невысокой точности метода ударного импульса можно добавить ещё два следующих фактора: низкую «проникающую способность» прибора из-за малой массы индентора, и возможное снижение прочности поверхностного слоя бетона конструкции вследствие проявления технологических нарушений: высушивания поверхности конструкции при несоблюдении правил ухода за бетоном, раннее распалубливание монолитных конструкций.

Несмотря на приведенные в табл. 8.3 данные, свидетельствующие в пользу применения комплексного метода, нельзя утверждать, что объединение оценок неразрушающих методов путем расчета их средневзвешенного значения, всегда дает лучший результат, чем оценки отдельных методов.

В таблицах 8.4, 8.5 и 8.6 приведены результаты статистической обработки данных испытания трех партий образцов-кубов 100x100x100 мм бетона проектного класса C25/30, изготовленных в разное время и твердевших в разных условиях. Рассчитывались средние значения оценок прочности образцов неразрушающими методами -  $f_{cm,cube}$ , коэффициент корреляции оценок прочности бетона  $i$ -м неразрушающим методом и данными испытаний образцов на прессе -  $r_{i, пресс}$ . В качестве количественной оценки соответствия результатов испытаний неразрушающими методами и прессовыми испытаниями использовалось остаточное среднее квадратическое отклонение оценок прочности образцов для каждого из методов, определенное, в соответствии с ГОСТ 17624-2012, по формуле:

$$S_T^i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (f_{c,cube,j}^i - f_{c,cube,j}^{пресс})^2}{n-2}}, \quad (8.14)$$

где  $S_T^i$  - остаточное среднее квадратическое отклонение для  $i$ -го метода;  $f_{c,cube,j}^i$  - оценка прочности  $j$ -го бетонного образца  $i$ -м неразрушающим методом;  $f_{c,cube,j}^{пресс}$  - оценка прочности  $j$ -го бетонного образца по ГОСТ 10180-2012;  $n$  - количество испытаний.

Таблица 8.4 – Данные лабораторных испытаний партии образцов-кубов № 1

Тип прибора	$r_{i, \text{пресс}}$	$f_{\text{cm.cube}}$ , МПа	$S_{\tau}$ , МПа	$S_{\tau}/f_{\text{cm.cube}}$ , %
ОМШ-1	0,903	32,8	3,9	11,8
УЗ	0,624	35,8	8,3	23,2
ИПС	0,820	29,8	6,1	20,5
<i>ОМШ-1/УЗ</i>	<b>0,810</b>	<b>34,3</b>	<b>4,4</b>	<b>12,9</b>
ОМШ-1+ИПС	0,887	31,3	6,3	20,2
УЗ+ИПС	0,713	32,8	4,2	12,9
<i>ОМШ/УЗ/ИПС</i>	<i>0,882</i>	<i>32,8</i>	<i>3,3</i>	<i>10,1</i>
ПРЕСС	1,000	31,9	0,0	0,0

Примечание: бетон проектного класса по прочности  $C^{25}/_{30}$ , срок твердения 14 сут. Коэффициент вариации результатов прессовых испытаний  $V_c = 18,2\%$ , средняя прочность бетона испытанной партии образцов – 31,9 МПа

Кроме отдельных оценок по каждому из использованных неразрушающих методов, в таблицах приведены результаты применения комплексов – объединенных оценок пар методов: {ОМШ-1 – УЗ} – метод упругого отскока и ультразвуковой метод, {ОМШ-1 - ИПС-МГ4} и {ИПС-МГ4 – УЗ}. Приведены также результаты объединения данных всех трех использованных неразрушающих методов.

Таблица 8.5 – Данные лабораторных испытаний партии образцов-кубов № 2

Тип прибора	$r_{i, \text{пресс}}$	$f_{\text{cm.cube}}$ , МПа	$S_{\tau}$ , МПа	$S_{\tau}/f_{\text{cm.cube}}$ , %
ОМШ-1	0,975	40,4	6,7	16,6
УЗ	0,869	42,2	6,1	14,4
ИПС	0,902	41,5	4,5	10,9
<i>ОМШ-1+УЗ</i>	<b>0,961</b>	<b>41,3</b>	<b>5,5</b>	<b>13,3</b>
ОМШ-1+ИПС	0,974	41,0	5,4	13,2
УЗ+ИПС	0,965	41,9	5,6	13,4
<i>ОМШ+УЗ+ИПС</i>	<i>0,971</i>	<i>41,4</i>	<i>5,2</i>	<i>12,6</i>
ПРЕСС	1,000	44,5	0	0,0

Примечание: образцы изготовлены на бетонорастворном узле.; бетон проектного класса по прочности  $C^{25}/_{30}$ , срок твердения 33 сут. Коэффициент вариации результатов прессовых испытаний  $V_c = 15,3\%$ , средняя прочность бетона испытанной партии образцов – 44,5 МПа

По данным табл. 8.5, лучшие показатели имеет прибор ИПС-МГ4, превосходя результаты всех остальных методов, включая и комплексы методов. Но, если рассматривать устойчивость оценок по всем испытанным партиям образцов, то преимущество будет у комплекса {ОМШ-1 – УЗ} и {ИПС-МГ4 – УЗ}, а также для комплекса из всех трех использованных методов.

Таблица 8.6 – Данные лабораторных испытаний партии образцов-кубов № 3

Тип прибора	$r_{i, \text{пресс}}$	$f_{\text{cm.cube}}$ , МПа	$S_T$ , МПа	$S_T/f_{\text{cm.cube}}$ , %
ОМШ-1	0,668	36,7	7,2	19,6
УЗ	0,806	39,3	6,9	17,6
ИПС	0,692	31,4	11,4	36,3
<i>ОМШ-1/УЗ</i>	<b>0,777</b>	<b>38,0</b>	<b>5,8</b>	<b>15,3</b>
ОМШ-1+ИПС	0,578	34,0	10,2	29,8
УЗ+ИПС	0,821	35,3	6,5	18,4
<i>ОМШ+УЗ+ИПС</i>	<i>0,775</i>	<i>35,8</i>	<i>6,8</i>	<i>19,0</i>
ПРЕСС	1,000	39,8	0,0	0,0

*Бетон проектного класса по прочности  $C^{25}/_{30}$ , срок твердения 33 сут. Коэффициент вариации результатов прессовых испытаний  $V_c = 19,1\%$ , средняя прочность бетона испытанной партии образцов – 39,8 МПа*

Средние показатели неразрушающих методов отличаются от данных прессовых испытаний на 3...13%, причем наилучший показатель по средней оценке прочности оказался у молотка Шмидта, а по остаточному среднему квадратическому отклонению - у ультразвукового импульсного метода. Образцы (таблиц 8.5 и 8.6) были изготовлены из бетона одной партии, но в разных условиях: в табл. 8.5 – данные испытания образцов, изготовленных на РБУ, в табл. 8.6 – изготовленных на объекте в период бетонирования колонн. Коэффициенты вариации прочности бетона по данным прессовых испытаний в обоих случаях отличаются – 16,3% и 19,1%, оценки прочности отличаются несколько меньше - на 11%. Оценки всех неразрушающих методов оказались несколько заниженными – на 3...5%.

Различие оценок прочности бетона прибором ИПС-МГ4 хорошо видно по данным табл. 8.5 и 8.6, если для кубов РБУ его оценки демонстрировали хорошую сходимость с прессовыми, то для образцов с объекта, показатели сходимости и разброса заметно ухудшились – разница средних оценок прочности достигла 21%, показатель разброса достиг 36,3%. Показатели комплекса «ОМШ-1 – УЗ» хоть и не достигали «рекордных» значений, но сохранялись стабильными для всех испытанных партий образцов, превосходя в отдельных случаях (табл. 8.6) объединенную оценку всех трех методов.

Интерес могут представлять данные вариантов комплексов, на основе различных пар методов. Выше отмечалось, что объединение оценок методов путем расчета их средневзвешенного значения не всегда дает лучший результат, чем оценки отдельных методов. В частности, в табл. 8.5 лучшие показатели имеет прибор ИПС-МГ4, превосходя результаты всех остальных методов, включая и комплексы методов. Но, если рассматривать устойчивость оценок по всем испытанным партиям образцов, то преимущество будет у комплекса «ОМШ-1 – УЗ» и «ИПС-МГ4 – УЗ», а также для комплекса из всех трех использованных методов. Немаловажным фактором в выборе методов составляющих комплекс является их «проникающая способность». Испытания бетонных полов с тонким упрочненным слоем на объекте «Паркинг» подземного общественно-торгового центра в 2004...2005 г. представленные в [80-83] наглядно демонстрируют степень чувствительности разных методов к состоянию открытых участков бетонных изделий.

Интерес может также представлять применение комбинированного метода в экстремальных условиях, выходящих за пределы допусков по действующим нормативам. На рис. 8.5 приведены диаграммы испытаний прочности бетона колонн находившихся на момент испытаний в замороженном состоянии более 5 суток

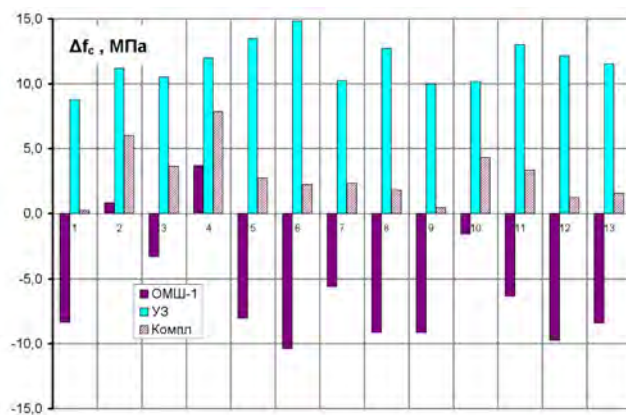


Рис. 8.5 – Отклонения оценок неразрушающими методами прочности бетона монолитных колонн от оценок методом отрыва со скалыванием; (бетон проектного класса C35/45, возраст бетона – 11...14 суток после электропрогрева и замораживания, температура бетона на момент испытаний  $-8^{\circ}\text{C}$ )

Температура бетона на момент испытаний составляла  $-8^{\circ}\text{C}$ . До замораживания твердение бетона обеспечивалось применением электропрогрева в течение полутора суток сразу после укладки бетонной смеси, с последующим выдерживанием без снятия опалубки. Характерным для замороженного бетона явилась смена знаков поправок для неразрушающих методов испытаний практически по всем испытанным колоннам: ультразвуковой метод стал давать завышенные оценки, а метод упругого отскока – заниженные. Кроме смены знака отклонений оценок прочности значительно увеличились и сами отклонения, если для конструкций твердевших и испытанных в нормальных условиях отклонения оценок прочности (в среднем) находились в пределах 3,5...4,5 МПа, то для замороженного бетона этот показатель возрос до 8...13 МПа. Характерным явилось и отрицательное значение коэффициента взаимной корреляции оценок прочности молотком Шмидта и ультразвуковым методом:  $r_{\text{Sh,us}} = -0,24$ .

Приведенные результаты согласуются с представлениями о физике процессов использованных неразрушающих методов. При малых значениях влажности замена поровой влаги льдом приводит к

увеличению динамического модуля упругости бетона, а это, в свою очередь, дает приращение скорости распространения ультразвукового импульса и, соответственно, - завышение оценки прочности. Снижение оценок метода упругого отскока также можно объяснить увеличением модуля упругости бетона при постоянной прочности (8.6).

На рис. 8.6 приведены данные испытаний тех же колонн (рис. 8.5) после оттаивания в течение 10 суток при средней температуре воздуха +5°C.

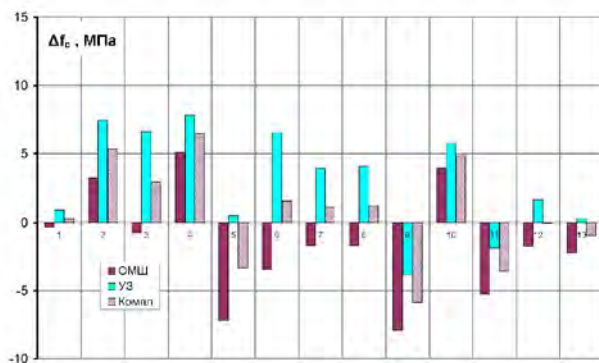


Рис. 8.6 – Отклонения оценок неразрушающими методами прочности бетона монолитных колонн от оценок методом отрыва со скалыванием; (бетон проектного класса C35/45, срок твердения – 23...26 суток после электропрогрева, замораживания и оттаивания, температура бетона на момент испытаний + 5°C)

Разброс оценок прочности каждым из методов заметно уменьшился, а коэффициент корреляции оценок прочности поменял знак на положительный и увеличился до значения 0,72.

На рис. 8.7 приведены абсолютные значения оценок прочности бетона по каждой из колонн и средние значения прочности для всей группы из 13 колонн.

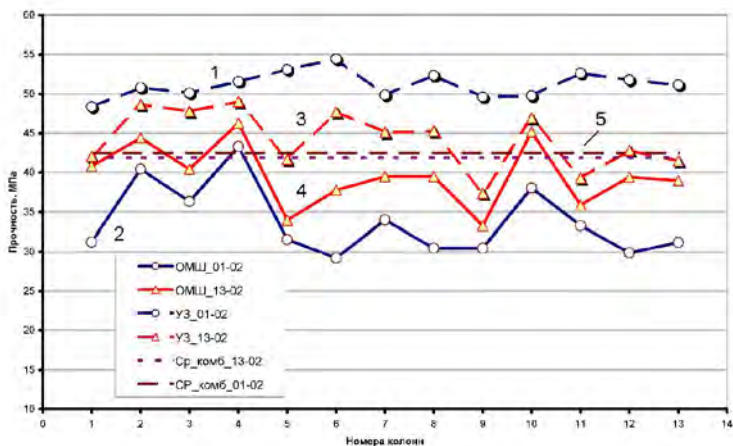


Рис. 8.7 – Прочность бетона монолитных колонн по данным неразрушающих методов испытаний: проектный класс бетона по прочности С35/45

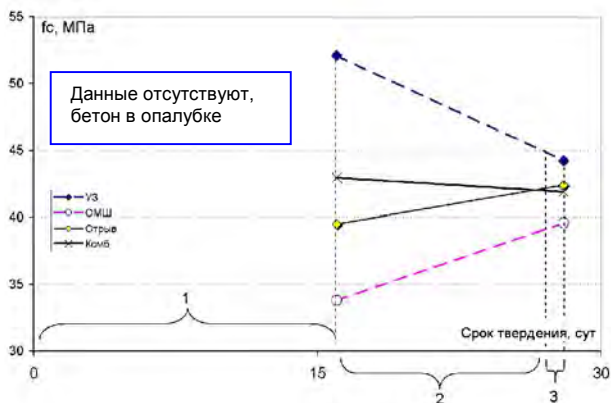
- 1 – оценки прочности замороженного бетона ультразвуковым методом;
- 2 - оценки прочности замороженного бетона методом упругого отскока;
- 3 – оценки прочности бетона после оттаивания ультразвуковым методом;
- 4 - оценки прочности бетона после оттаивания методом упругого отскока;
- 5 – средняя прочность бетона всей группы колонн комбинированным методом

Можно отметить две особенности, свидетельствующие в пользу применения комбинированного метода неразрушающих испытаний бетона в конструкциях:

- показатели испытаний оттаявшего бетона (показаны треугольными маркерами) не выходят за пределы области ограниченной значениями этих же показателей (круглые маркеры) для замороженного бетона;

- средние значения прочности по данным комбинированного метода для всей группы колонн (показаны горизонтальными линиями на рис. 8.7) практически совпадают, - для замороженного бетона  $f_{ср} = 42,1$  МПа, для оттаявшего -  $f_{ср} = 45,5$  МПа. На рис. 8.8 показана кинетика набора прочности бетона в привязке к характерным периодам температуры окружающего воздуха.





Срок твердения, сут	16	28
$\Delta f_{C, I}$	-6 МПа (15,2%).	-3,6 МПа (9,1%)
$\Delta f_{C, US}$	13 МПа (33%),	2,8 МПа (7,2%)
$\Delta f_{C, COMB}$	3,6 МПа (9,0%)	-0,8 МПа (2,1%)
$f_{C, Pull Out}$	39,5 МПа	42,5 МПа

Рис. 8.8 – Кинетика твердения монолитного бетона по данным неразрушающих методов испытаний:

1 – интервал времени – 16 суток, температура воздуха -2..-10°C;

2 – интервал времени – 8 суток, температура воздуха -10..-4 °C;

3 – интервал времени – 4 суток, температура воздуха 0..+5 °C;

Полученные данные показывают, что для оценки прочности бетона  $f_{c, is}$  в проектном возрасте (28 сут.) комбинированным методом, после оттаивания бетона в течение 4 суток при положительной температуре не требует введения каких-либо корректирующих коэффициентов при использовании зависимости (8.13), при значении весового коэффициента  $k = 1,31$ .

Применение формулы (8.13) для оценки прочности замороженного бетона дает завышение около 3 МПа, что составляет около 7%, что само по себе является удовлетворительным результатом, учитывая, что погрешности для отдельных методов входящих в комплекс составляю: для ультразвукового метода – 13 МПа (33%), для метода упругого отскока – 6 МПа (15,4%). Для коррекции комбинированного метода испытаний следует скорректировать весовой коэффициент  $k$  зависимости (8.13) до значения 1,93.

## 8.2 Экстраполирующий (мультипликативный) алгоритм комбинирования

Все приведенные выше данные неразрушающих методов получены испытанием поверхности изделий, что во многих случаях не может гарантировать достоверности оценки прочности массива бетона. Изготовление монолитных изделий при низких температурах, с использованием электродного прогрева или прогрева проводом, может приводить к заметным различиям температурного режима, а значит и различию показателей прочности наружных и внутренних слоев бетона, особенно при использовании металлической опалубки с недостаточной теплоизоляцией. Аналогичный эффект может вызвать раннее снятие опалубки, без принятия должных мер по удержанию в бетоне влаги и тепла. Поэтому весьма важной для повышения достоверности контроля прочности бетона на основе комплекса неразрушающих методов выглядит потенциальная способность ультразвукового метода прохождения «чувствовать» состояние внутренних участков бетонного монолита, чем не обладает ни один из известных механических методов.

Свойство комплементарности (дополнительности) методов измерений может рассматриваться в различных аспектах. Оно может выражаться отрицательным коэффициентом корреляции объединяемых оценок контролируемого параметра, а может быть выражено различием в пространственной локализации контролируемых областей бетона каждого из методов. Комбинирование позволяет распространить (экстраполировать) с помощью калибровочного метода (рис. 8.9) данные так называемого «опорного» метода на условия, в которых он не может быть применен. Например – выполнить контроль *виртуальным* механическим методом в удаленной от поверхности области бетона.

На рис. 8.10 показаны границы областей бетона, физико-механические свойства которых проявляют себя в оценках прочностных показателей бетона склерометрическими методами и ультразвуковым методом прохождения.



развукового метода. Границы зоны зависят от расстояния между преобразователями 3, длины волны ультразвука и ее типа, и метода регистрации времени распространения ультразвукового импульса.

В соответствии с рис. 8.9 основу мультипликативной формы объединения составляет весовой (экстраполирующий) коэффициент для «опорного» метода. В этом случае второй из объединяемых методов является калибровочным для «опорного», например, ультразвуковой метод может быть калибровочным для метода динамического индентирования. На рис. 8.11 показана блок-схема алгоритма комплексирования.

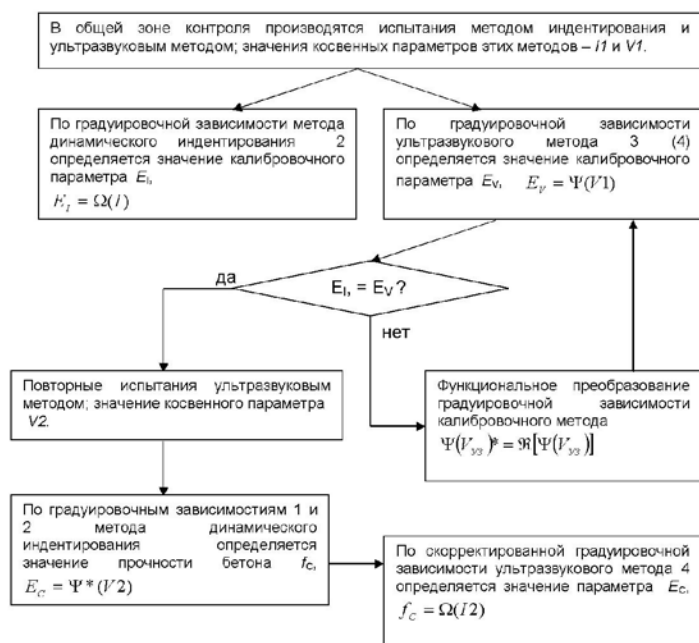


Рис. 8.11 – Алгоритм объединение показателей неразрушающих методов контроля бетона в комплекс с использованием калибровочного метода

Ультразвуковой импульсный метод использован в качестве калибровочного. С его помощью производится коррекция данных метода динамического индентирования. Последовательность коррекции представлена на рис. 8.12.

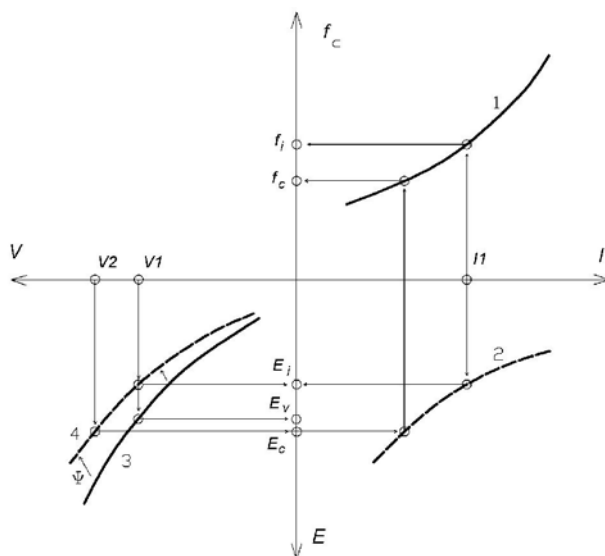


Рис. 8.12 – Объединение показателей неразрушающих методов контроля бетона в комплекс с использованием калибровочного метода

Применительно к схеме рис. 8.10 реализация алгоритма следующая. В одной и той же зоне контроля производятся испытания методом индентирования и ультразвуковым методом; значения косвенных параметров этих методов –  $I1$  и  $V1$ . Прочность бетона  $f_c$  участка контроля (рис. 8.10) определяют в зависимости от разницы динамических модулей упругости поверхностного слоя бетона  $E_{\Delta}$  и внутренней области бетона участка контроля  $E_{\Delta,V}$  из системы уравнений

$$f_c = \frac{1}{1+\theta} \left( \theta \cdot e^{0.091(E_V-E)} f_{c,I} + f_{c,V} \right), \quad (8.15)$$

$$\theta = 0,0026 \cdot f_c^2 - 0,115 \cdot f_c + 2,79$$

где  $f_c$  – прочность бетона в контролируемого участка конструкции, МПа;  $f_{c,I}$  и  $f_{c,V}$  – соответственно оценки прочности бетона участка контроля конструкции методом индентирования и ультразвуковым импульсным методом, МПа;  $\theta$  – безразмерный коэффициент.

## ГЛАВА 9

# ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ

При возведении высотных<sup>6</sup> и уникальных по архитектуре зданий зачастую становится проблематичным использовать несущие конструкции с большими запасами прочности, что при сочетании неблагоприятных факторов может увеличить риск их разрушения. А использование высокопрочных бетонов склонных к хрупкому разрушению может создать предпосылки прогрессирующего обрушения конструкций. В связи с этим, с целью обеспечения необходимого уровня безопасности, как на стадии возведения, так и в период эксплуатации здания, важную роль приобретают системы автоматизированного мониторинга за деформационным состоянием несущих конструкций здания.

Назначением информационно-измерительной системы автоматизированного мониторинга является снижение риска аварийной ситуации на основе ранней диагностики изменений напряженно-деформированного состояния конструкций и локализации мест такого изменения. При этом очевидно, что контроль деформационного состояния несущих конструкций должен носить систематический и долговременный характер.

По действующим в Беларуси нормативам [18] для всех проектируемых в Республике высотных зданий «... необходимо предусматривать научно-техническое сопровождение, включающее комплекс мероприятий, в том числе геотехнический мониторинг, мониторинг состояния несущих конструкций и фасадных систем, необходимые испытания конструкций и материалов, аэродинамические испытания и др.».

Структурно в системе автоматизированного мониторинга можно выделить два уровня:

- технический, в который входит собственно система сбора информации с сенсорными элементами, физическим интерфейсом

---

<sup>6</sup> Высотным является многоэтажное здание жилого назначения высотой от 75 до 100 м включительно, общественного и многофункционального назначения - высотой от 50 до 200 м включительно

объединения сенсоров в информационную сеть, центральным сервером под управлением программного пакета *SCADA* (*supervisory control and data acquisition*) для сбора, архивации, долговременного хранения информации и обеспечения доступа к ней ответственных лиц;

- уровень принятия решений, ядром которого является алгоритм распознавания приближения аварийной ситуации по совокупности фактических значений полученных от сенсоров параметров деформации контролируемых элементов.

В настоящее время на рынке приборных средств нет недостатка в предложениях такого рода измерительно-информационных систем. Типичными контролируемыми параметрами являются величины линейной деформации, углы наклона и колебательное ускорение. Дополнительно могут устанавливаться сенсоры скорости и направления ветра, сенсоры температуры, а также датчики акустической эмиссии.

Идеальным было бы снабдить каждый элемент силового каркаса здания всем перечнем сенсоров. В реальности, конструктору приходится руководствоваться принципом разумной достаточности, принимая в рассмотрение конструктивную схему здания, характеристики грунта, диапазон рабочих нагрузок, вероятные техногенные и прочие факторы, а также характер использования помещений. Установка датчиков линейной деформации, независимо от физического принципа их работы, требует достаточно протяженной базы, на которой производится регистрация взаимного перемещения контрольных точек конструкции. Но это может быть неприемлемым по архитектурным или эстетическим соображениям. Один из “эконом-вариантов” – в выборе системы сенсоров деформаций может быть основан на использовании датчиков угловых перемещений – так называемых инклинометров. Типичные модели инклинометров обеспечивают измерение углов своего наклона в двух ортогональных вертикальных плоскостях  $X$  и  $Y$  (рис. 9.1). Система установки инклинометров должна обеспечивать максимальную информативность, позволяя регистрировать наиболее вероятные изменения геометрии несущего каркаса здания. С таких позиций наиболее эффективными местами установки инклинометров являются несущие колонны в осях по периметру дисков перекрытий монолитного кар-

каса. Для прямоугольных в плане зданий целесообразно устанавливать инклинометры на угловых колоннах

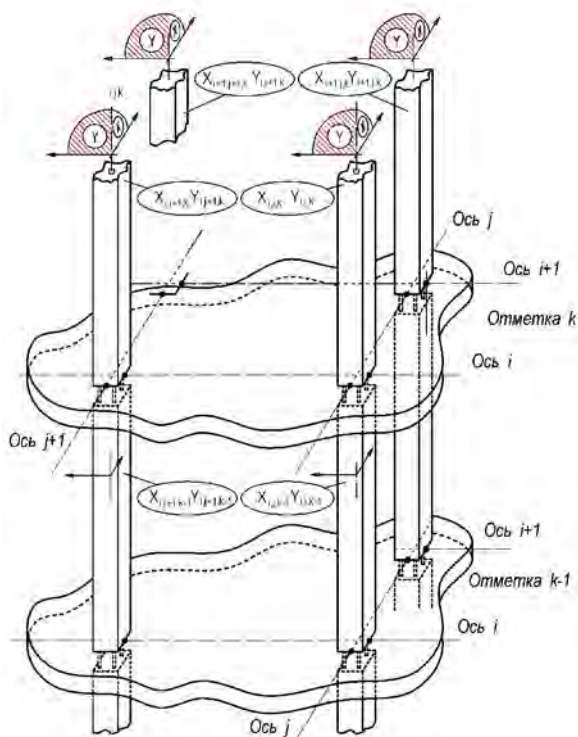
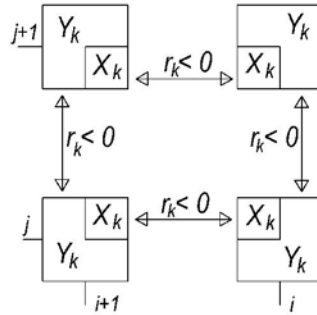
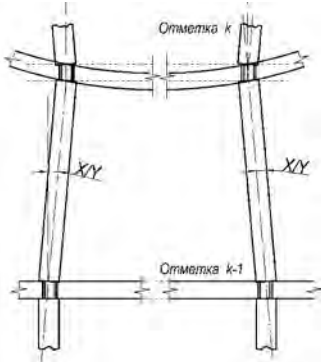


Рис. 9.1 – Схема привязки индексов инклинометров и углов наклона колонн к осям здания

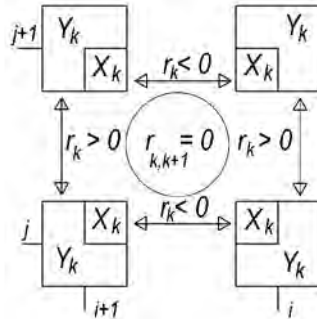
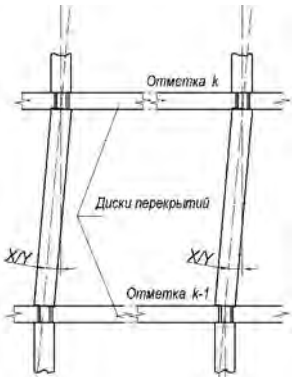
Наиболее вероятные деформационные изменения несущего каркаса представлены на рис. 9.2 и рис. 9.3. Для всех приведенных схем факт деформации каркаса может быть зарегистрирован по изменению углов наклона контролируемых колонн, а конкретный вид деформации – по показателям корреляционных связей углов наклона. На рис. 9.2, б показана деформация сдвига каркаса в пределах одного этажа здания: изменяются углы наклона колонн одного этажа, колонны смежные по высоте с контролируруемыми сохраняют свое угловое положение.



а



б



в

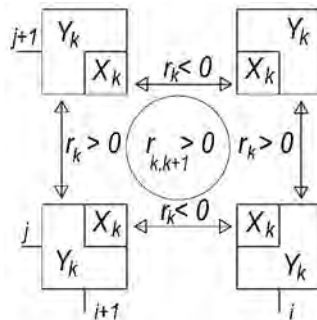
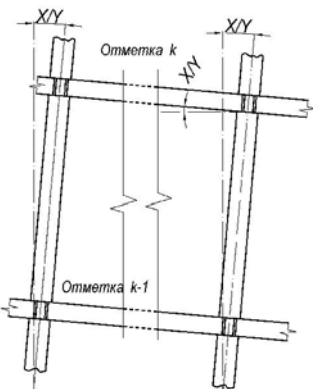
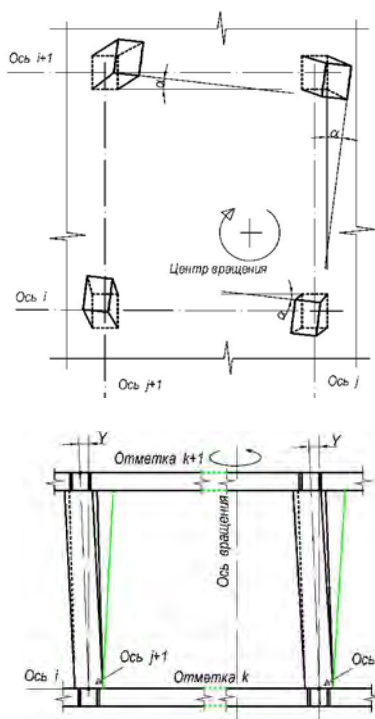


Рис. 9.2 – Схемы деформации фрагментов несущего каркаса здания (слева); соотношения коэффициентов корреляции углов наклона колонн (справа)

а



б

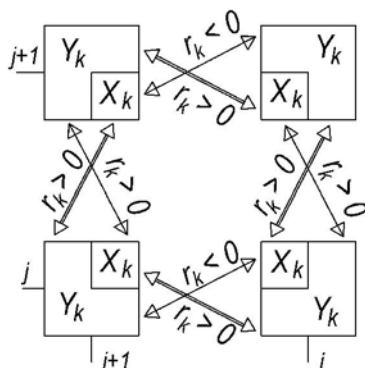


Рис. 9.3 – Схема деформации кручения фрагмента несущего каркаса здания (а); соотношения коэффициентов корреляции углов наклона колонн (б)

На рис. 9.2, в отображен наклон всего каркаса здания: углы наклона смежных по высоте колонн одинаковы. Схемы корреляционных связей в пределах одного этажа по рис.9.2, б и рис.9.2, в совпадают. Отличие рис. 9.2, в состоит в появлении корреляции углов наклона колонн  $k$ -го этажа с углами колонн  $k+1$  или  $k-1$  этажей. Ориентация осей колонн и наименования углов наклона на рис. 9.2, рис. 9.3 выполнены в соответствии с рис. 9.1.

На рис. 9.3 отображена деформация кручения каркаса. Характерным для такого типа деформации является взаимная корреляция углов в ортогональных плоскостях  $X$  и  $Y$  (см. рис. 9.3, б).

В случае плоскопараллельного вертикального смещения колонн (рис. 9.4) угловое положение колонн сохраняется неизменным. Та-

кое событие может иметь место при неравном распределении нагрузки на несущий каркас, либо – в случае подвижки фундамента здания. Регистрация такой деформации возможна инклинометром, установленным на одном из дисков перекрытий.

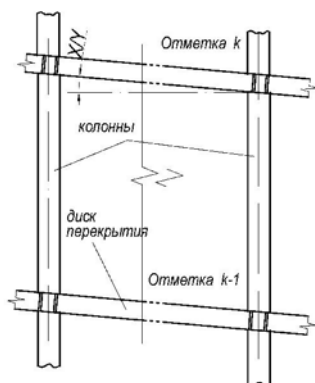


Рис. 9.4 – Схема деформации при плоскопараллельном смещении колонн несущего каркаса здания

Реальная картина деформирования несущего каркаса здания может представлять комбинацию приведенных на рис. 9.2 ... рис. 9.4 вариантов. Соответственно, схеме корреляционных связей контролируемых углов будет суперпозиция рассмотренных выше составляющих.

Один из первых вопросов, которые возникают в начале эксплуатации системы автоматизированного мониторинга – о предельных значениях контролируемых параметров. Если по величине допустимой линейной деформации для конкретного элемента можно указать границы значений, то каким образом можно судить о состоянии соседнего элемента, на котором датчика деформации нет, но известны изменения углов наклона рядом расположенных? Нормативы дают лишь общие рекомендации, в частности, в п.10.1.1 ТКП 45-3.02-108-2008 указано: «предельные горизонтальные перемещения верха высотных зданий с учетом крена фундаментов при расчете по недеформированной схеме в зависимости от  $h$  (где  $h$  – расстояние от верха фундамента до верха несущих конструкций перекрытия) не должны превышать:

- при  $h$ , м до 150 включ. – 1/500;
- то же 200 – 1/600.

При высоте  $h$  от 150 до 200 м значения предельных горизонтальных перемещений следует определять по интерполяции». Какими могут быть отклонения показателей отдельных элементов или конструкций решать придется проектировщику.

Таким образом, создание системы мониторинга включает в себя решение следующих задач:

- выбора ключевых контролируемых элементов каркаса здания, обладающих наибольшей чувствительностью к вероятным видам деформации каркаса;
- выбора аппаратной основы измерительной системы, в первую очередь - перечня используемых сенсоров;
- формирования алгоритма оценки деформации силового каркаса здания по данным измерений состояния ключевых элементов каркаса.

На данный момент решение указанных задач не приобрело необходимой для практики степени формализации, а выбор аппаратуры и программного обеспечения системы в большинстве случаев ориентирован на стоимостную составляющую коммерческих предложений.

Перспективу в решении указанных вопросов может открыть технология *информационного моделирования зданий (Building Information Modelling - BIM)*. Разработанная на стадии проектирования и дополняемая в процессе возведения и эксплуатации трехмерная информационная модель здания, где для каждого элемента модели закладываются сведения о его упруго-деформативных и прочностных параметрах, позволит по изменению состояния группы контролируемых элементов, рассчитать состояние остальных. Соответственно можно решать и обратную задачу – выбрать «ключевые» элементы, наиболее чувствительные к вероятным деформациям каркаса.

### 9.1. Технические средства системы мониторинга «АККЕ»

Объектом мониторинга являлось высотное здание с монолитным железобетонным каркасом (рис. 9.5) «Современный многофункцио-

нальный торгово-развлекательный комплекс с гостиницей и паркингом в г.Минске».



Рис. 9.5 – Общий вид строительной площадки: вид объекта в июне 2015 г. (вверху); строительная площадка в октябре 2013 г. (внизу)

Комплекс является сложным объектом, представляет собой 21-этажное здание, состоящее из двух основных частей: 6-ти этажной стилобатной части (торгового центра) и 14-этажной гостиницы.

Система «АККЕ» производства компании «Tieto-Oskari Oy» (Финляндия) автоматизированного мониторинга объекта представляет собой совокупность технических средств для сбора информации от первичных сенсоров, передачи и накопления ее в центральном базовом блоке системы (рис. 9.6), обеспечения доступа к информации по каналам сети Internet. Реализованный в системе алгоритм раннего обнаружения критических отклонений контролируемых параметров, в совокупности с аппаратным обеспечением, позволяет автоматически подавать сигналы предупреждения по сети мобильной связи.



Рис. 9.6 – Центральный блок системы

Сенсоры контроля геометрических отклонений несущего каркаса здания являются беспроводными и установлены в подвальном этаже, 7 и 21 этажах в ключевых узлах конструкций здания. На кровле были установлены проводные сенсор скорости и направления ветра и сенсор-акселерометр. Информация, получаемая от сенсоров, содержит косвенные данные о напряженно-деформационном состоянии несущих конструкций, температуре в местах установки сенсоров.

Обработка сигналов сенсоров происходит в режиме реального времени в центральном базовом блоке системы.

Размещение центрального блока системы предусматривается в помещении с круглосуточным пребыванием персонала. Центральный блок обеспечивает хранение результатов мониторинга на протяжении 20 лет непрерывного функционирования системы. Для обработки данных на удаленных серверах базовый блок системы подключается к выделенному каналу Интернет. Установленное специализированное программное обеспечение (программный пакет "АККЕ Manager"), позволяет реализовать алгоритм раннего предупреждения – рассылку сигналов предупреждения или тревоги по каналам мобильной связи и (или) сети Интернет ответственным лицам. Подключение ПЭВМ к автоматизированной системе мониторинга - по кабелю через интерфейс RS-232.

Основными сенсорными элементами системы автоматизированного мониторинга напряженно-деформированного состояния несущих конструкций объекта являются трехосевые датчики углов наклона – инклинометры (рис. 9.7), объединенные с остальными компонентами системы в информационную сеть и работающие в режиме реального времени.

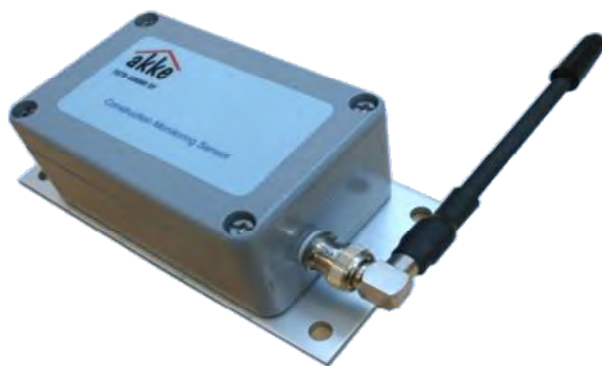


Рис. 9.7 – Сенсор-инклинометр с беспроводным интерфейсом

Основные параметры инклинометров приведены в прил. таблице Д.1. Все датчики системы имеют сертификаты соответствия. Автономное питание от встроенной литиевой батареи обеспечивает непрерывную работу сенсора до 8 лет. На рис. 9.8 приведена схема соединений элементов системы в информационную сеть.

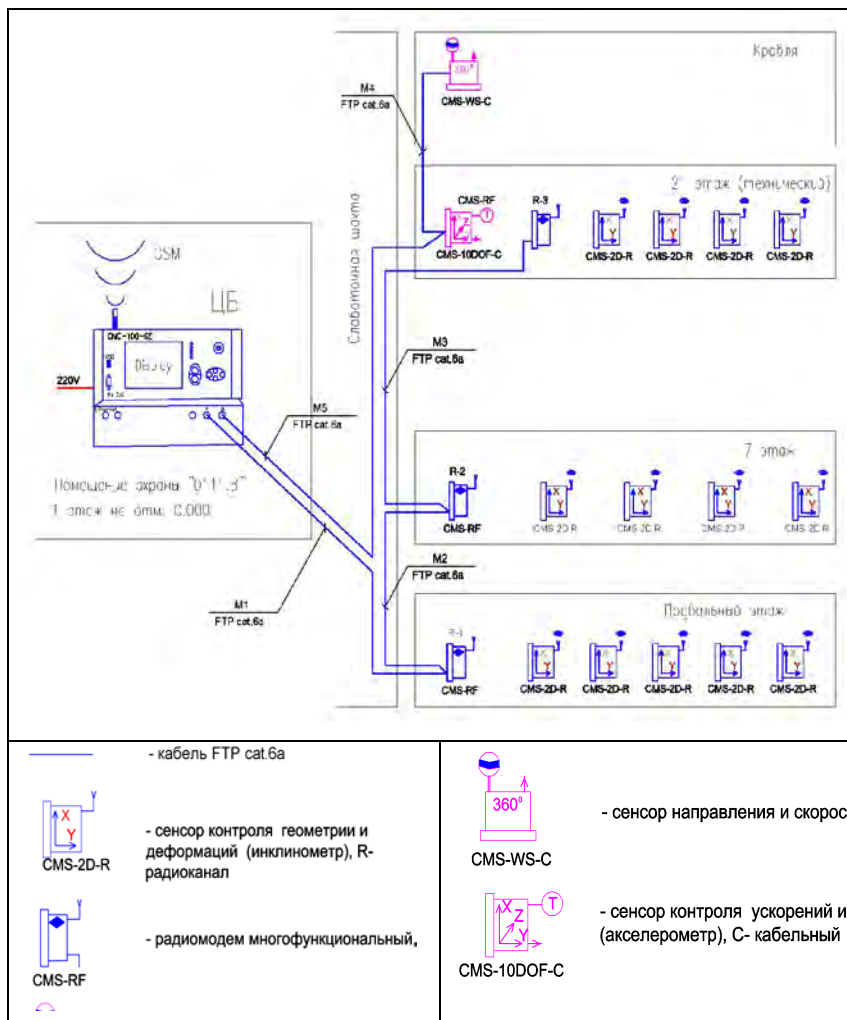


Рис. 9.8 – Схема информационной сети системы автоматизированного мониторинга

### Сенсоры системы

Размещение сенсоров системы произведено в местах, в соответствии с планами на размещение узлов системы по зданию комплекса, приведенных на чертежах рис. Д.1 и рис. Д.2 (см. прил. Д).



Типовое расположение сенсоров – инклинометров – на угловых колоннах несущего каркаса здания (рис. 9.1). Схематехническое исполнение инклинометров позволяет дистанционное конфигурирование для построения сети сенсоров в зависимости от проекта установки по стандартным открытым протоколам передачи данных. Рабочее положение сенсоров – горизонтальное (рис. 9.9), крепление к несущим конструкциям (колоннам) на расстоянии не менее 30 см от перекрытия.

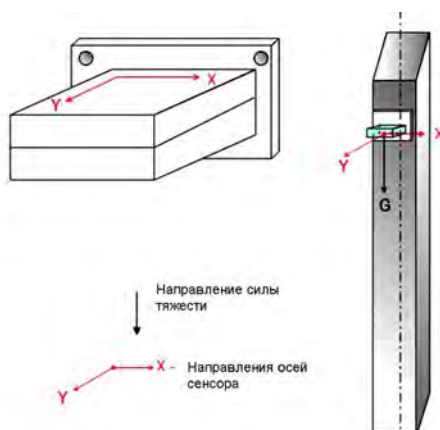


Рис. 9.9 – Ориентация осей сенсора-инклинометра в рабочем положении

Радиомодемы (роутеры) (рис. 9.10) служат для осуществления обмена данными между базовой станцией и сетью беспроводных сенсоров, являясь промежуточными элементами линий информационной сети, осуществляя функцию регенерации сигналов датчиков в условиях сильного затухания радиоволн.

Основным назначением ультразвукового сенсора горизонтальной скорости и направления ветра (рис. 9.10) является контроль ветровых нагрузок на здание. Это особенно важно в случае высотных и широкопролетных строений. Сенсор рассчитан на наружную установку на верхних отметках сооружений. Отсутствие подвижных частей делает его пригодным для использования в различных климатических условиях и устраняет необходимость проведения профилактических работ. Питание сенсора осуществляется по кабелю от центрального блока системы мониторинга. Основные техни-

ческие характеристики использованной на объекте мониторинга системы приведены в таблице Д.2 (см. прил. Д).



Рис. 9.10 – Беспроводной модем (слева) и датчик направления и скорости ветра

Назначение инерциального модуля (рис. 9.11) – измерение колебательных ускорений.

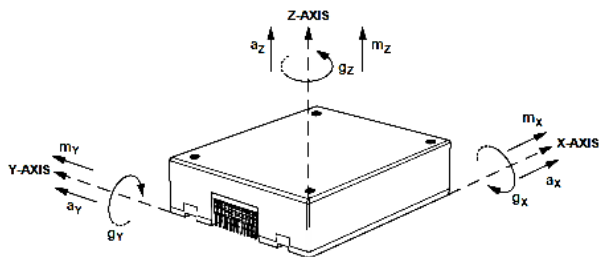


Рис. 9.11 – Инерциальный модуль: направление стрелок указывает положительные направления ускорений

## 9.2 Методика обработки данных мониторинга

Прямое непрерывное автоматическое измерение линейных характеристических размеров несущего каркаса хоть и является, в принципе, технически разрешимой задачей, но связано со значительными ограничениями, препятствующими нормальной эксплуатации помещений здания. Компромиссным решением задачи мони-

торинга деформации несущего каркаса, в известных системах такого назначения является использования в качестве информационных параметров – углов наклона нескольких ключевых конструкций каркаса с помощью соответствующих сенсоров – инклинометров. Выбор ключевых контролируемых конструкций и количество устанавливаемых сенсоров должен производиться, как уже указывалось, на основе анализа вероятностных моделей деформации каркаса, что является нетривиальной задачей, зависящей от конкретного конструктивного исполнения здания, эволюции упруго-прочностных характеристик конструкционных материалов, характеристик грунтов и внешних воздействий. Ясной, однозначной регламентации этого вопроса действующими нормативами нет.

### *Корреляционный анализ величин деформаций*

Предварительный анализ сигналов сенсоров-инклинометров за период июль – сентябрь 2015 года показал присутствие значительной динамической составляющей, имеющей стохастический характер. Это могло иметь разные причины, в том числе и не связанные с реальной деформацией элементов каркаса: ударными вибрациями при транспортировке и продолжающемся монтаже оборудования здания, шумами измерительного тракта сенсоров, значительными перепадами напряжения питающей сети.

Основу несущего каркаса объекта составляли несущие монолитные колонны, диски монолитных перекрытий и элементы поперечной жесткости. Такая конструктивная схема обуславливает сильную связанность элементов каркаса в пределах каждого этажа, и взаимную зависимость деформации элементов. Поэтому предлагаемую фирмой АККЕ схему расчета линейных деформаций колонн в зонах установки сенсоров, рассматривающую угловые перемещения элементов каждого этажа каркаса независимо от остальных, считаем не совсем корректной. Для расчета линейных перемещений элементов необходимо знать значение измерительной базы – расстояния точки монтажа сенсора от условной точки, относительно которой происходит вращение контролируемого элемента. Определение координат этой точки является нетривиальной задачей, которая может быть решена только после накопления достаточно большой выборки данных. На этапе начальной эксплуатации системы мониторинга целесообразно-

но выяснить основные факторы, влияющие на показания инклинометров.

Для уточнения наблюдаемой деформационной картины произведен корреляционный анализ сигналов сенсоров в пределах отдельных этажей, а также оценка корреляции усредненных углов наклона между этажами и определена корреляция угловых отклонений контролируемых элементов объекта с температурой элементов.

Корреляционный анализ выполняют с целью установления связи между величинами деформаций зданий и сооружений, а также возможными причинами их возникновения. Предварительное суждение о корреляционной связи можно делать на основе изучения графика, по одной оси которого откладывают величины деформаций, а по другой - величины, характеризующие изменения того или иного фактора (рост нагрузки на основание фундамента, колебание уровня грунтовых вод, изменение температуры и т.д.). Количественно степень связи определяется коэффициентом корреляции

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)(y_i - y_m)}{n \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad (9.1)$$

где  $x_m$  и  $y_m$  – средние значения величин  $x$  и  $y$ ;  $n$  – число отсчетов (наблюдений);  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – средние квадратические отклонения величин  $x$  и  $y$

Для оценки надежности коэффициента корреляции при  $n < 50$  рекомендуется использовать критерий Фишера. При  $n > 50$  среднее квадратическое отклонение коэффициента корреляции рекомендуется определять по формуле

$$\sigma(r) = \frac{1 - r^2}{\sqrt{n}}. \quad (9.2)$$

Связь между величинами  $x$  и  $y$  является установленной, если выполняется условие

$$r \geq 3\sigma(r).$$

### Коррекция векторов деформации

Сенсоры – инклинометры после установки на контролируемые элементы каркаса здания имеют разную взаимную ориентацию (см. рис. 9.12, рис. 9.13 и рис. Д.1, рис. Д.2 приложения), в результате чего координатные оси инклинометров (рис. 9.9) не совпадают. Пересчет координат векторов деформаций каждого из сенсоров к *приведенной* системе координат  $X^*$ ,  $Y^*$  выполнено по формулам таб. 9.1, в соответствии со схемами монтажа сенсоров (рис. 9.12, 9.13).

Ориентация осей приведенной системы координат  $X^*$  и  $Y^*$  сенсоров по отношению к зданию показана на рис. 9.13: ось  $X^*$  параллельна осям А1, В1,...К1, ось  $Y^*$  - осям 2, 3, 4, 5 здания.

Таблица 9.1 – Пересчет угловых координат наклона инклинометров к приведенной системе координат

№ сенсора	Приведенная координата $X^*$	Приведенная координата $Y^*$
ID-01	Y	X
ID-02	$Y \cdot (-1)$	$X \cdot (-1)$
ID-03	$Y \cdot (-1)$	$X \cdot (-1)$
ID-04	Y	X
ID-05	X	Y
ID-06	X	Y
ID-07	$X \cdot (-1)$	Y
ID-08	Y	X
ID-09	$Y \cdot (-1)$	$X \cdot (-1)$
ID-10	$X \cdot (-1)$	Y
ID-11	$X \cdot (-1)$	Y
ID-12	$Y \cdot (-1)$	$X \cdot (-1)$
ID-13	$X \cdot (-1)$	$Y \cdot (-1)$
56 (акселерометр)	Y	X

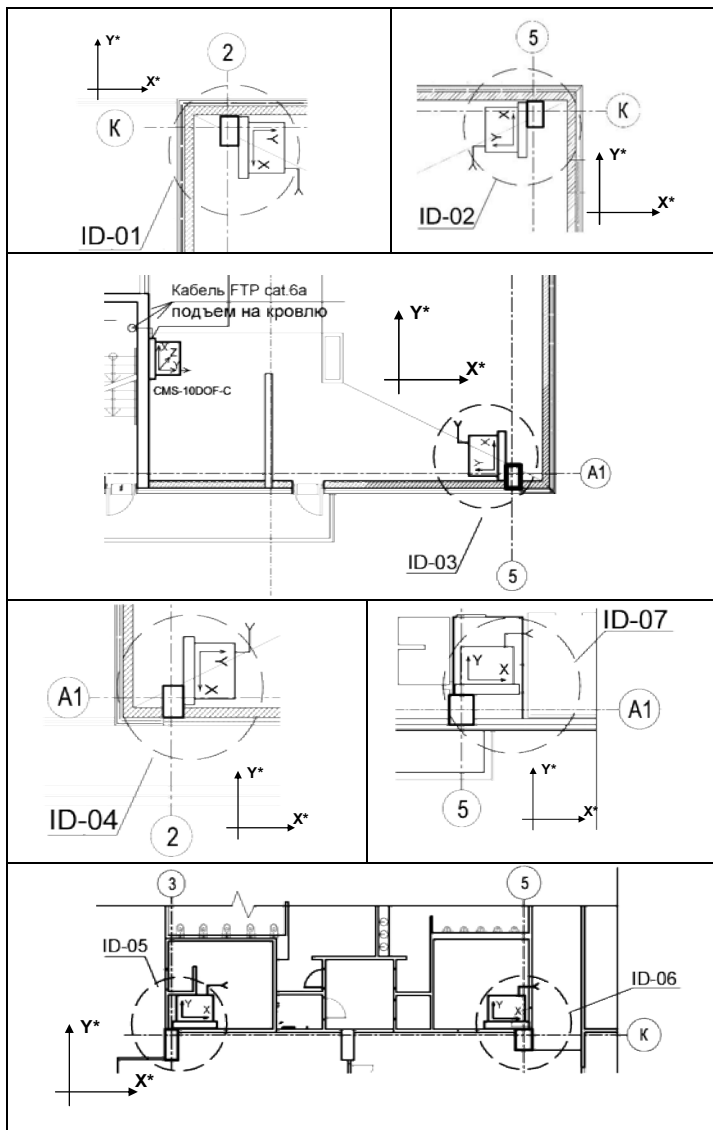


Рис. 9.12 – Ориентация сенсоров – инклинометров ID-01...ID-07 и акселерометра CMS-10DOF-C относительно приведенной системы координат  $X^*$   $Y^*$

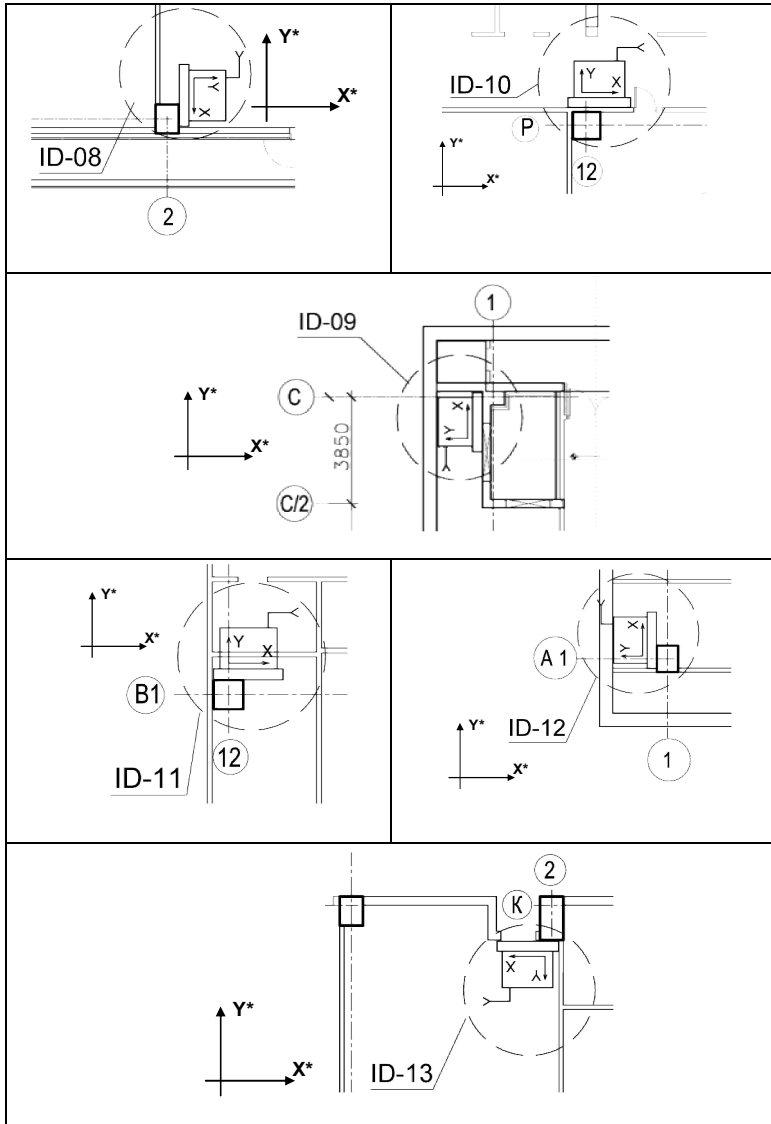


Рис. 9.13 – Ориентация сенсоров – инклинометров ID-08...ID-13 подвального этажа здания относительно приведенной системы координат  $X^* Y^*$

### 9.3 Технические результаты мониторинга

В основе мониторинга конструкций лежит принцип регистрации угловых отклонений сенсора от нормального (первоначального) положения. Непосредственно после установки сенсоров и пробного включения системы было произведено обнуление сигналов, что соответствовало начальному углу установки сенсоров. В ходе испытаний выяснилось, что ряд сенсоров не имеют устойчивой связи с базовым блоком, что потребовало переноса некоторых элементов системы и установки дополнительных репитеров – радиомодемов. После этих работ сенсоры не обнулялись, и в качестве начального состояния сенсоров были приняты их показатели на момент начала пробной эксплуатации 19.08.2015 г.

Съем информации производился периодически, при непосредственном доступе к системе через *web*-сервер или *FLASH* накопитель. Накопление информации каждого сенсора-инклинометра, датчика скорости и направления ветра, и акселерометра происходит путем записи блоков информации в три файла: файл хранения информации опроса сенсора через 10 минут, файл хранения усредненных показателей сенсоров за 1 час и файл хранения усредненных показателей сенсоров за сутки. В таб. Д.3...Д.5 прил.Д приведены фрагменты данных с различным временным разрешением указанных трех файлов в формате *MS Excel*.

На рис. 9.14, рис. Д.4 и рис. Д.5 прил. Д приведены диаграммы угловых перемещений сенсоров в плоскости осей  $X^*$ ,  $Y^*$ . Среднее значение углового перемещения  $Ang_m$  рассчитывалось по формуле

$$Ang_m = \arctg\left(\frac{X_m^*}{Y_m^*}\right), \quad (9.3)$$

где  $X_m^*$ ,  $Y_m^*$  – средние значения угловых координат по всей группе сенсоров этажа

$$X_m^* = \frac{1}{n} \sum_1^n X_i^*, \quad Y_m^* = \frac{1}{n} \sum_1^n Y_m^* .$$



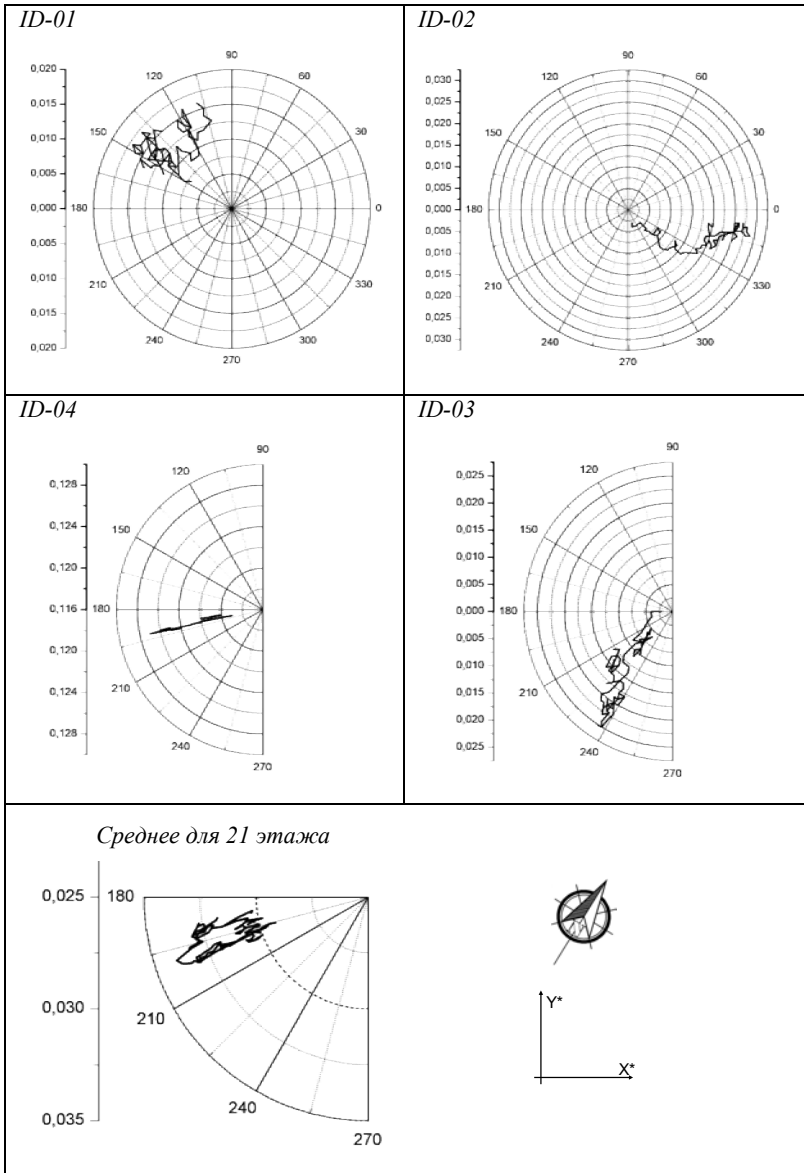


Рис. 9.14 – Годографы векторов угловых перемещений инклинометров

технического этажа здания за период с 02.09.2015 г. по 25.01.2016 г.

За период наблюдений (19.08.2015 – 25.01.2016) средняя величина перемещений составляла 0,007...0,025 углового градуса. При этом для некоторых датчиков (ID-01, ID-09) наблюдались единичные кратковременные выбросы до 0,02 углового градуса. Поскольку выбросы не повторялись, то можно предположить, что причиной их явились ударные нагрузки при транспортировании и монтаже оборудования здания.

Датчиком ID-04 зафиксировано возрастание угла наклона на 0,12 углового градуса в период с 05.09.2015 в интервал времени между 16-00 и 17-00, - в основном по координате  $X^*$ . По координате  $X^*$  скачок составил 0,115 градуса, по координате  $Y^*$  - 0.016 градуса. До 16-00 05.09.2015 и после 17-00 07.09.2015 угол оставался постоянным, имея незначительные вариации в соответствии с температурными изменениями. Аналогичный скачок угла наклона (0,9 градуса) наблюдался для датчика ID-07 01.09.2015. Поскольку остальными датчиками на техническом и 7 этажах каких-либо заметных изменений в этот период не зафиксировано, то вероятной причиной таких значительных изменений положения указанных датчиков может явиться подвижка крепежных элементов датчиков.

На рис. 9.15...9.22 показаны совместные диаграммы изменений модулей угла наклона контролируемых колонн и температуры.

Данные рисунков указывают на явно выраженную корреляцию угловых перемещений колонн здания и температуры колонн. В таблице 9.2, таблицах Д.6, Д.7 (см. прил. Д) и на рис. 9.16, рис. 9.18, рис. 9.20, рис. 9.22 приведены показатели взаимной корреляции модулей углов наклона и их корреляции с температурой. Расчет модулей углов *mod* каждого сенсора производился по формуле

$$mod = \sqrt{(X^*)^2 + (Y^*)^2} . \quad (9.4)$$

Для уточнения величины температурного дрейфа показаний инклинометров и его возможного влияния на полученные данные фирмой поставщиком были выполнены тестовые испытания датчиков в диапазоне изменения температуры от -45°C до +75°C (см. приложение Е). Результаты тестов сняли подозрения о подверженности инклинометров температурному дрейфу и позволили сделать вывод

о том, что изменения углов явились следствием деформационных изменений геометрии несущего каркаса здания.

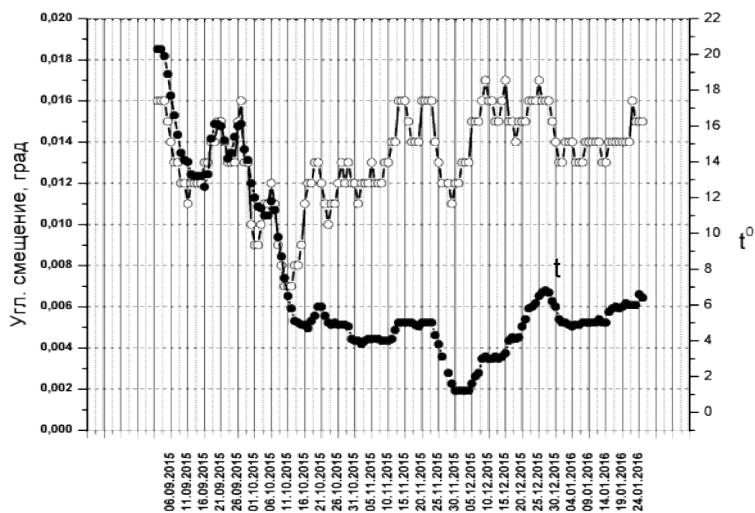


Рис. 9.15 – Совместные временные диаграммы модуля угловых перемещений инклинометра ID-01 технического этажа и температуры за период с 02.09.2015 г. по 25.01.2016 г.

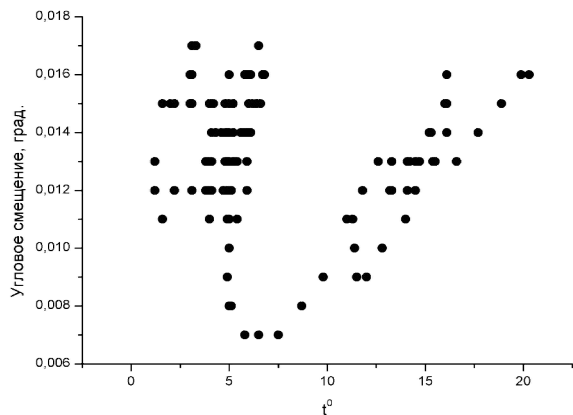


Рис. 9.16 – Зависимость угловых смещений сенсора ID-01 от температуры

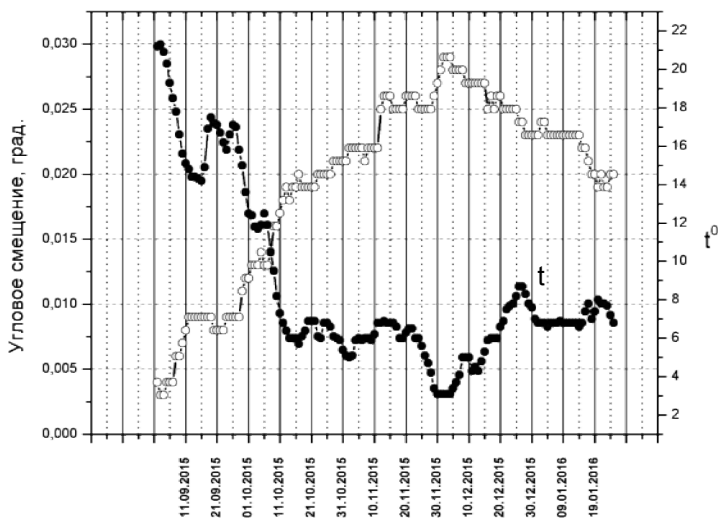


Рис. 9.17 – Совместные временные диаграммы модуля угловых перемещений инклинометра ID-02 технического этажа и температуры за период с 02.09.2015 г. по 25.01.2016 г.

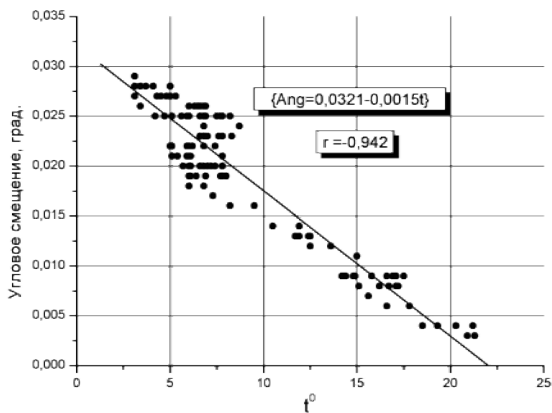


Рис. 9.18 – Зависимость угловых смещений сенсора ID-02 от температуры

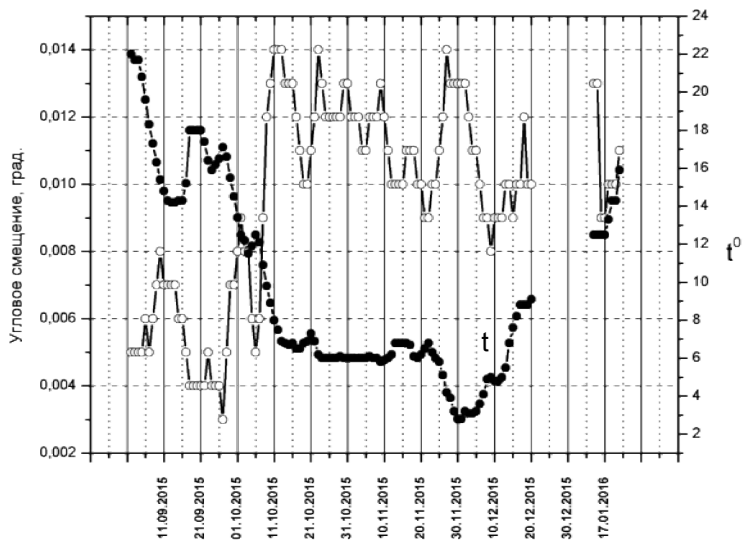


Рис. 9.19 – Совместные временные диаграммы модуля угловых перемещений инклинометра ID-05 7- этажа и температуры за период с 02.09.2015 г. по 25.01.2016 г.

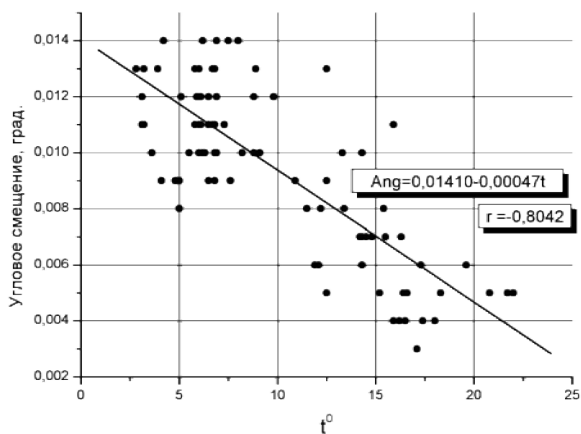


Рис. 9.20 – Зависимость угловых смещений сенсора ID-05 от температуры

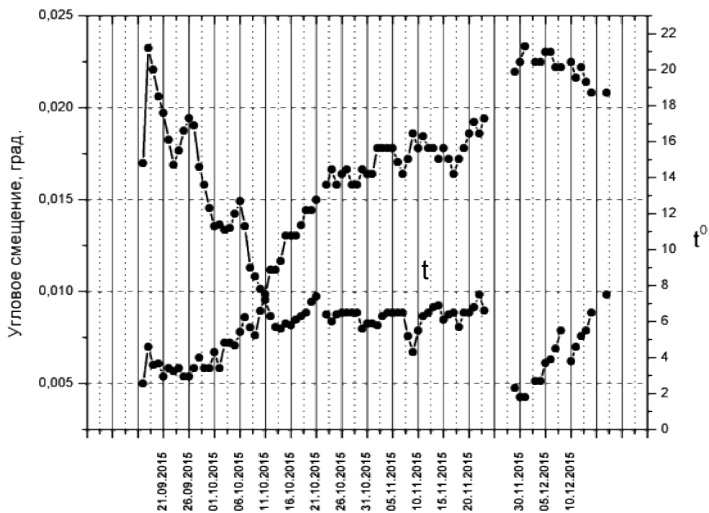


Рис. 9.21 – Совместные временные диаграммы модуля угловых перемещений инклинометра ID-06 7- этажа и температуры за период с 02.09.2015 г. по 25.01.2016 г.

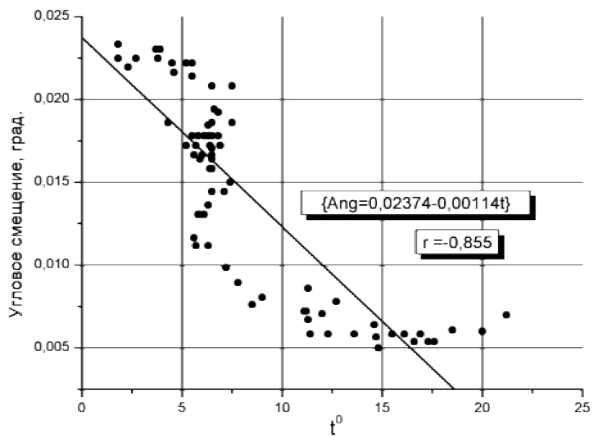


Рис. 9.22 – Зависимость угловых смещений сенсора ID-06 от температуры

Таблица 9.2 – Коэффициенты взаимной корреляции угловых отклонения колонн 21 этажа и их корреляции с температурой

		ID-01			ID-02			ID-03			ID-04		
		X*	Y*	mod	X*	Y*	mod	X*	Y*	mod	X*	Y*	mod
ID-01	X*		-0,161		<b>-0,879</b>	0,100	-0,875	<b>0,699</b>	<b>0,679</b>	-0,707	<b>0,610</b>	0,475	-0,604
	Y*				-0,164	0,222	-0,170	0,258	0,352	-0,323	-0,081	-0,057	0,087
	mod				0,367	0,192	0,354	-0,152	-0,103	0,132	-0,326	-0,228	0,326
ID-02	X*	<b>-0,879</b>	-0,164	0,367		-0,125		<b>-0,837</b>	<b>-0,855</b>	0,876	<b>-0,600</b>	-0,480	0,591
	Y*	0,100	0,222	0,192				0,551	0,400	-0,447	<b>0,547</b>	<b>0,598</b>	-0,553
	mod	-0,875	-0,170	0,354				-0,868	-0,875	0,899	-0,635	-0,523	0,627
ID-03	X*	<b>0,699</b>	0,258	-0,152	<b>-0,837</b>	0,551	-0,868				<b>0,723</b>	<b>0,638</b>	-0,718
	Y*	<b>0,679</b>	0,352	-0,103	<b>-0,855</b>	0,400	-0,875				<b>0,596</b>	<b>0,584</b>	-0,592
	mod	-0,707	-0,323	0,132	0,876	-0,447	0,899				-0,639	-0,602	0,635
ID-04	X*	<b>0,610</b>	<b>-0,081</b>	-0,326	<b>-0,600</b>	0,547	-0,635	<b>0,723</b>	<b>0,596</b>	-0,639			<b>0,966</b>
	Y*	0,475	-0,057	-0,228	-0,480	<b>0,598</b>	-0,523	<b>0,638</b>	<b>0,584</b>	-0,602			
	mod	-0,604	0,087	0,326	0,591	-0,553	0,627	-0,718	-0,592	0,635			
Температура		<b>0,846</b>	0,252	-0,273	<b>-0,945</b>	0,376	-0,960	<b>0,956</b>	<b>0,914</b>	-0,954	<b>0,685</b>	<b>0,565</b>	-0,676

Влияние ветровой нагрузки на деформацию каркаса здания в период наблюдения не выявлено. На рис. 9.23 приведена «роза ветров» для периода наблюдений, построенная для относительных показателей.

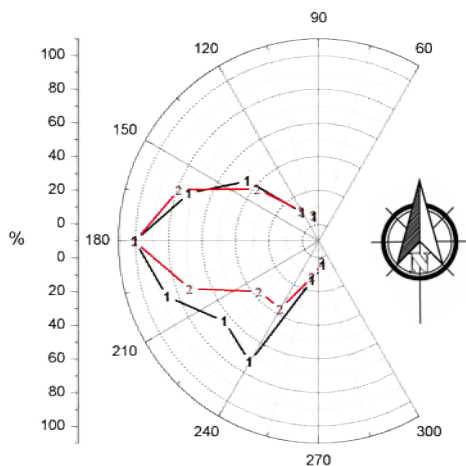


Рис. 9.23 – Роза ветров для объекта за период наблюдения с 19.08.2015 по 30.09.2015

Радиус точек диаграммы 1 рис. 9.23 прямо пропорционален количеству дней наблюдаемого направления ветра. Радиус точек диаграммы 2 прямо пропорционален произведению количеству дней наблюдаемого направления ветра на среднюю скорость ветра данного направления.

\* \* \*

Выполненные работы показали достаточно высокую эффективность использования инклинометров в качестве измерительной основы автоматизированной системы мониторинга несущего каркаса строительных объектов. Показатели чувствительности и долговременной стабильности метрологических характеристик инклинометров позволяют регистрировать практически любые деформационные изменения геометрии несущего каркаса здания, в том числе, обусловленные вариацией температуры. Следует отметить компактность конструкции и удобство монтажа рассмотренных датчиков. Указанное их качество в сочетании с беспроводным интерфейсом позволяет оперативно, с малыми издержками организовать информационно-измерительную мониторинговую сеть, а при необходимости осуществлять её переконфигурирование в эксплуатируемых зданиях и сооружениях. В качестве основы алгоритма обработки данных предлагается корреляционный анализ приращений углов наклона.



## Библиографический список

1. Авраменко, С.Л. Корреляционный метод определения скорости распространения акустической волны в крупногабаритных компактных изделиях из бетона / С.Л. Авраменко // Дефектоскопия. 2009. № 1. – С. 54-67
2. Акустическая эмиссия материалов и конструкций: материалы 1 Всесоюзной конференции, Ростов-на-Дону. Часть I / Ростовский университет; под ред. И.И. Воровича. – 1989. – 161 с.
3. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 462 с.
4. 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.
5. Бакиров, М.Б. Инструкция «Определение характеристик механических свойств металла оборудования атомных электростанций безобразцовыми методами по характеристикам твердости» / М.Б. Бакиров., В.В. Потапов, Г.О. Яровой [и др.]. РД 30 0027-94, концерн «Росэнергоатом», Т. 1,2. – М., 1994. – 15 с.
6. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писаненко. – М.: Изд. литературы по строительству, 1971. – 206 с.
7. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. – М.: Госстройиздат, 1961. – 96 с.
8. Бетон. Часть 1. Требования, показатели, изготовление и ответственность: СТБ EN 206-1-2011.
9. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. – Минск: Минстройархитектуры, 2003. – 139 с.
10. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-2012. – Введ. 01.07.2013. – М.: 2013. – 30 с.
11. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля: ГОСТ 22690-88. – Введ. 01.01.91. – М.: 1991. – 22 с.
12. Бетоны. Правила контроля прочности: ГОСТ 18105-2010. – Введ. 01.09.12. – М.: 2010. – 16 с.

13. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности: ГОСТ 17624-2012. – Введ. 01.01.2014. – М.: 2014. – 16 с.

14. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций: ГОСТ 28570-90 – Введ. 01.01.91. – М.: 1991. – 14 с.

15. Блещик, Н.П. Прогнозирование модуля деформации бетона на основе структурно-механической модели с учетом технологических свойств бетонной смеси / Н.П. Блещик // Вестник БГТУ, Строительство и архитектура. - 2002. - № 1(13). – С. 3-5.

16. Ботаки, А.А. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов/ А.А. Ботаки, В.Л. Ульянов, А.В. Шарко. – М.: Машиностроение, 1983. – 78 с.

17. Вайншток, И.С. Физические основы ультразвукового импульсного метода оценки прочности бетона / И.С. Вайншток // Бетон и железобетон. – 1969. - № 7. - С. 3-6.

18. Высотные здания. Строительные нормы проектирования. ТКП 45-3.02-108-2008.

19. Глухов, Н.А. Точечные источники ультразвука как инструмент контроля физико-механических свойств материалов / Н.А. Глухов // Дефектоскопия. – 1992. - № 8. - С. 49-51.

20. Головин, Ю.И. Наноиндентирование как средство комплексной оценки физико-механических свойств материалов в субмикроробъектах / Ю.И. Головин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009 - №5 , том 75, С 45-59.

21. Гринченко, В.Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / В.Т Гринченко, В.В. Мелешко. – Киев: Наукова Думка, 1981. – 284 с.

22. Губайдуллин, Г.А. Приборный комплекс оперативного контроля прочности бетона / Г.А. Губайдуллин // В мире неразрушающего контроля. – 2002. - №2(16). – С.21-22.

23. Данилов, В.Н. Моделирование работы преобразователей с сухим точечным контактом в режиме возбуждения / В.Н. Данилов, А.А. Самокрутов // Дефектоскопия. – 2004. - № 10. – С. 15–22.

24. Данилов, В.Н. О влиянии статического давления прямого преобразователя на направленность поля излучения / В.Н. Данилов // Дефектоскопия. – 1986. - № 5. – С. 24–29.

25. Джонс, Р. Неразрушающие методы испытаний бетонов / Р. Джонс, И. Фэкзоару. – М.: Стройиздат, 1974. – 295 с.

26. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: «Мир», 1989. – 509 с.
27. Дзенис, В.В. Применение ультразвуковых преобразователей с точечным контактом для неразрушающего контроля / В.В. Дзенис. – Рига.: Изд. «Зинатне», 1987. – 261 с.
28. Дзенис, В.В. Ультразвуковой контроль твердеющего бетона / В.В. Дзенис, В.Х. Ласпа. – М.: Стройиздат, 1971. – 111 с.
29. Дубовой, Б.Ш. О комплексировании неразрушающих методов контроля свойств твердеющего бетона / Б.Ш. Дубовой // Бетон и железобетон. – 1969. - № 7. - С. 27-28.
30. Ермолов, И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И.Н. Ермолов. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
31. Зайцев В.Ю. Амплитудно-зависимая диссипация в микроненородных средах с линейным поглощением и упругой нелинейностью / В.Ю. Зайцев, Л.А. Матвеев // Геология и Геофизика. – 2006. Т. 47, № 5. – С. 695-710.
32. 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.
33. Испытания бетона. Неразрушающий контроль прочности: СТБ 2264-2012 – Введ. 01.01.2013. – Минск: Госстандарт, 2013. - 20 с.
34. Качанов, В.К. Проблемы ультразвукового контроля протяженных сложноструктурных изделий с большим затуханием сигналов / В.К. Качанов, И.В. Соколов // Дефектоскопия. – 2007. - № 8. - С. 82-93.
35. 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.
36. Клевцов, В.А. Об определении изменчивости прочности бетона при испытании неразрушающими методами / В.А. Клевцов // РААСН. Вестник отделения строительных наук. – 2000. – Вып.3. – С. 147.
37. Клевцов, В.А. Об организационно-технических проблемах НК прочности бетона / В.А. Клевцов, М.Г. Коревицкая // В мире неразрушающего контроля. – 2002. - №2(16). – С. 16-17.

38. Ковалев, А.В. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция / А.В. Ковалев, В.Н. Козлов, А.А. Самокрутов // Дефектоскопия. – 1990. - № 2. - С. 29-41.

39. Козлов, В.Н. Контроль бетона ультразвуковым эхо-импульсным томографом с сухим контактом / В.Н. Козлов, А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // Контроль. Диагностика. – 1998. – №1. – С. 49-51.

40. Коноплев, С.Н. Организация контроля прочности бетона монолитных конструкций по образцам / С.Н. Коноплев // Технологии бетонов. – 2015. - № 5-6. – С.42-45.

41. Коноплев, С.Н. Снова о доминирующем методе контроля прочности бетона монолитных конструкций / С.Н. Коноплев // Технологии бетонов. – 2015. - № 1-2. – С.44-46.

42. Коноплев, С.Н. Проблемы применения стандартов на бетоны нового поколения на практике / С.Н. Коноплев // Технологии бетонов. – 2014. - № 7. – С.8-10.

43. Конструкции железобетонные. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры: ГОСТ 22904-93 – Введ. 01.01.95. – М.: 2010. – 11 с.

44. Коревицкая, М.Г. Контроль прочности монолитного бетона неразрушающими методами в раннем возрасте / М.Г. Коревицкая, В.Н. Артамонова, Т.Ю. Лапенис // Бетон и железобетон. – 1993. - № 1. - С. 27-28.

45. Коревицкая, М.Г. Неразрушающие методы контроля качества железобетонных конструкций / М.Г. Коревицкая. – М.: Высшая школа, 1993. - 76 с.

46. Кравцов, В.Н. Неразрушающий контроль прочности и качества конструкций из «обезличенного» бетона и грунтобетонных свай в эксплуатируемых и строящихся зданиях / В.Н. Кравцов // Бетон и железобетон в третьем тысячелетии: Материалы второй международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 2002. – С. 146-152.

47. Кузнецов, А.П. Нелинейные колебания: Уч. пособие для вузов / А.П. Кузнецов, С.П. Кузнецов, Н.М. Рыскин. – М.: Изд. ф.-м. литературы, 2002. – 292 с.

48. Ланге, Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций / Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 1991. – 270 с.

49. Лебедев А.В. Нелинейная акустическая спектроскопия локальных дефектов в геоматериалах / А.В. Лебедев, Л.А. Островский, А.М. Сутин // Акуст. журн., 2005, т. 51, Приложение, с. 115-129
50. Леонович, С.Н. Результаты мониторинга прочностных характеристик монолитных бетонных плит на основе неразрушающих методов контроля / С.Н. Леонович, Д.Ю. Снежков, В.С. Мулярчик // Вестн. Брестск. гос. техн. ун-та. Часть 2, Строительство и архитектура. - 2004. - С. 115-121.
51. Леонович, С.Н. Мониторинг прочностных характеристик монолитных бетонных плит основания неразрушающим экспресс-контролем / С.Н. Леонович, Д.Ю. Снежков, В.С. Мулярчик // Технология строительства и реконструкции: проблемы и решения: сб. науч. тр. междунар. конф. ТСР-2004, посвященной 85-летию БНТУ, том 1; под ред. Б.М. Хрусталева. - Минск, 2006. - С. 188-195.
52. Лещинский, М.Ю. Испытание бетона: Справочное пособие / М.Ю. Лещинский. – М.: Стройиздат, 1980. – 358 с.
53. Лужин, О.В. Неразрушающие методы испытания бетона / О.В. Лужин, В.А. Волохов, Г.Б. Шмаков [и др.]. – М., Стройиздат, 1985. - 177 с.
54. Марковский, М.Ф. Технология ранней распалубки монолитных перекрытий каркасных зданий / М.Ф. Марковский Г.А. Туровец // Строительная наука и техника. – 2005. - №2. – С. 43-49.
55. Маслов, Б.Я. Измерение энергии и амплитуды импульсов АЭ сигналов / Б.Я. Маслов, В.А. Коротеев, А.Е. Стецюк // Дефектоскопия. - 2005. № 6. – С 17-21.
56. Матюнин, В.М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов: пособие для научных и инженерно-технических работников / В.М. Матюнин – М.: Изд. дом МЭИ. 2006. – 216 с.
57. Мацулевич, О.В. Применение прибора ИПБ-1Б для неразрушающего контроля прочности бетона / О.В. Мацулевич // Технологии бетонов. – 2014. - № 7. – С.12-13.
58. 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.

59. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия. ГОСТ 22761-77, дата актуализации: 15.10.2015

60. Механика контактных взаимодействий / С.М. Айзикович [и др.]; под ред. И.В. Воровича и В.М. Александрова. – М.: Физматлит, 2001. – 670 с.

61. Милов, В.А. Устройства для контроля прочности / В.А. Милов. – М., «Машиностроение», 1976. - 127 с.

62. Муравин, Г.Б. Акустическая эмиссия при деформировании бетона / Г.Б. Муравин // Дефектоскопия. – 1982. – № 12. – С. 3-12.

63. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Клюев [и др.], под ред. В.В. Клюева. – М., Машиностроение, 1995. – 347 с.

64. Никитина Н.Е., Акустоупругость. Опыт практического применения / Н.Е. Никитина. – Н.Новгород, ТАЛАН, 2008, С 208

65. Новацкий, В. Теория упругости / В. Новацкий. – М.: Мир, 1975. - 872 с.

66. Носов, В.В. Микромеханическая модель акустической эмиссии гетерогенных материалов / В.В. Носов, И.Н. Бураков // Дефектоскопия. – 2004. – № 2. – С. 53-62.

67. Носов, В.В. Оценка прочности и ресурса технических объектов с помощью метода акустической эмиссии / В.В. Носов, А.И. Потапов, И.Н. Бураков // Дефектоскопия. – 2009. – № 2. – С. 47-58.

68. О методике определения прочности бетона без разрушения / Б.Г. Скрамтаев, М.Ю. Лещинский // Известия АСИА СССР. – 1961. - №1. – С 20-29.

69. Партон, В.З. Механика разрушения: от теории к практике / В.З. Партон. – М.: «Наука», 1990. - 239 с.

70. Пецольд, Т.М. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования / Под ред. Т.М. Пецольда, В.В. Тура. – БГТУ, 2003. – 378 с.

71. Поручиков, В.Б. Методы динамической теории упругости / В.Б. Поручиков. – М.: Наука, 1986. – 328 с.

72. Почтовик, Г.Я. Применение ультразвука для исследования работы под нагрузкой железобетонных конструкций транспортных сооружений / Г.Я. Почтовик, Р.О. Красновский // Ультразвук в

строительной технике: под ред. Ю.А. Нилендера. – М.: Госстройиздат, 1962. – С. 154-161.

73. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 281 с.

74. Руденко, О.В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики / О.В. Руденко. – УФН. 2006. Т. 176, № 1. – С. 97-102.

75. Рудницкий, В.А. Испытание эластомерных материалов методами индентирования / В.А. Рудницкий, А.П. Крень; под ред. П.П. Прохоренко. – Минск : Белорус. наука, 2007. – 227 с.

76. Рычков, С.П. Моделирование конструкций в среде MSC. VisualNastran для Windows / С.П. Рычков. – М.: НТ Пресс, 2004. – 545 с.

77. Сагайдак, А.И. Связь сигналов акустической эмиссии с процессами деформирования и разрушения строительных конструкций / А.И. Сагайдак, С.В. Елизаров // Дефектоскопия. - 2004. – № 11. – С. 11-14.

78. Скрамтаев, Б.Г. Испытания прочности бетона в образцах, изделиях и сооружениях / Б.Г. Скрамтаев, И.Ю. Лещинский. – М.: Изд. лит. по строительству, 1964. – 176 с.

79. Снежков, Д.Ю. Мониторинг железобетонных конструкций на основе неразрушающих испытаний бетона: методы контроля, критерии соответствия / Д.Ю.Снежков, С.Н. Леонович, Л.В. Ким // Вестник инженерной школы ДВФУ, №1(22) 2015, - С. 82-90.

80. Снежков, Д.Ю. Оценка класса по прочности бетона монолитных конструкция: нормирование, методы, критерии / Д.Ю.Снежков, С.Н. Леонович // Бетоны, оборудование, опалубка 2015-2016, спец. выпуск журнала «Мир дорог»: 2015, С-т Петербург - С. 11-17.

81. Снежков, Д.Ю. Анализ методик неразрушающих испытаний бетона конструкций по действующим государственным стандартам и нормам Евросоюза / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович, А.В. Вознищик // Наука и техника – 2013, №2 – Минск: БНТУ. – С. 33-39.

82. Снежков, Д.Ю. Исследование неравнопрочности бетона на объекте монолитного строительства комплексным неразрушающим методом / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович // «Известия вузов. Строи-

тельство». Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет. – 2009. – № 8. – С. 108-115.

83. Снежков, Д.Ю. Неразрушающий контроль бетона монолитных конструкций / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович // Строительная наука и техника, №4(25), Минск, 2009. - С. 76-84.

84. Снежков, Д.Ю. О влиянии армирования при ультразвуковом контроле прочности бетона / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович, Ю.И. Лагун // Строительная наука и техника, №3(24), Минск, 2009. - С. 46-52.

85. Снежков, Д.Ю. Неразрушающий контроль бетона в монолитном строительстве: совершенствование средств и методов / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович. – Минск: БНТУ, 2006. – 218 с.

86. Снежков, Д.Ю. Совершенствование аппаратных средств ультразвукового контроля бетона / Д.Ю. Снежков // Вестн. Брестск. гос. техн. ун-та. Часть 2, Строительство и архитектура. - 2004. - С. 125-128.

87. СТБ EN 13791-2012 Оценка прочности на сжатие конструкций и элементов сборного бетона в реальных условиях. Минск: Госстандарт, 2012. - 18 с.

88. Судаков, В.В. Контроль качества и надежности железобетонных конструкций / В.В. Судаков. – Л.: Стройиздат, 1980. - 166 с.

89. Сутан Мохаммед, Н., Оценка эффективности неразрушающего контроля повреждений бетона / Н. Мохаммед Сутан, М.С. Сафар // Дефектоскопия. – 2003. – №2, - С 30-35.

90. Тур, В.В. Статистический контроль прочности бетона на сжатие в соответствии с требованиями СТБ EN 206-1: 2000 и ГОСТ 18105-2010 (EN 206-1: 2000, NEQ), ч.4 / В.В. Тур // Технологии бетонов. – 2015. - № 5-6. – С.8-11.

91. Тур, В.В. Статистический контроль прочности бетона на сжатие в соответствии с требованиями СТБ EN 206-1: 2000 и ГОСТ 18105-2010 (EN 206-1: 2000, NEQ), ч.2 / В.В. Тур // Технологии бетонов. – 2014. - № 11. – С.30-34.

92. Тур, В.В. Статистический контроль прочности бетона на сжатие в соответствии с требованиями СТБ EN 206-1: 2000 и ГОСТ 18105-2010 (EN 206-1: 2000, NEQ), ч.1 / В.В. Тур // Технологии бетонов. – 2014. - № 9. – С.48-52.

93. Ужполявичус Б.Б. Внедрение неразрушающих методов контроля качества бетона, железобетонных изделий и конструкций /



Б.Б. Ужполявичус // Тезисы докладов Всесоюзной конференции НТО стройиндустрия, М. – 1975. – С. 78-79.

94. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / редкол.: И.П. Голямина [и др.]. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 396 с.

95. Фролов, Д.И. Связь между параметрами акустических сигналов и размерами разрывов сплошности при разрушении гетерогенных материалов / Д.И. Фролов, Р.Ш. Килькеев, В.С. Куксенко // Механика композитных материалов. – 1980. – №5. – С. 907-911.

96. Фурса, Т.В. Разработка нового неразрушающего метода контроля процесса трещинообразования в бетоне под воздействием климатических факторов / Т.В. Фурса, В.Е. Зуева, А.А. и др. // Технологии бетонов – 2013. - № 2. – С.36-38.

97. Фурса, Т.В. Неразрушающий механоэлектрический метод определения прочности бетона в изменяющихся температурно-влажностных условиях/ Т.В. Фурса, А.П. Суржиков, К.Ю. Осипов // Дефектоскопия – 2009. – №9. – С. 88-93.

98. Фурса, Т.В. Разработка неразрушающего метода контроля прочности бетона с дефектной структурой на основе явления механоэлектрических преобразований / Т.В. Фурса, К.Ю. Осипов, Д.Д. Данн // Дефектоскопия – 2011. – №5. – С. 39-43.

99. Фурса, Т.В. О механизме механоэлектрических преобразований при ударном возбуждении композиционных материалов на основе цементного вяжущего / Т.В. Фурса // Журнал технической физики - 2001, том 71, вып. 7. – С. 53-56.

100. Шевалдыкин, В.Г. Диагностические возможности аппаратуры для УЗК бетона / В.Г. Шевалдыкин // В мире неразрушающего контроля. – 2004. - №1(23). – С.8-12.

101. Штенгель, В.Г. Ультразвуковой контроль структуры бетона / В.Г. Штенгель // В мире неразрушающего контроля. – 2004. - №1(23). – С.4-7.

102. Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen: DIN EN 13791-2009

103. Brožovsky, J. Check of pressed/vibropressed concrete product properties by means of nondestructive testing methods: a quality control tool in the course of production. / Technology of construction and reconstruction (TCR-2004) / – Minsk, 2006. – P. 98-104.

104. Brozovsky, J. Using of non-destructive methods for strength detection on blended cements and paving blocks / J. Brozovsky, O. Mate-

jka and P. Martinec // Ed. Inderscience Enterprises Ltd., International Journal of Microstructure and Materials Properties (IJMMP), Vol. 1, Nos 3/4, ISSN 1741-8410, 2006. - P. 282-296.

105. Brožovský, J. Concrete interlocking paving blocks compression strength determination using non-destructive methods / J. Brožovský, O. Matějka, P. Martinec // The 8-th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing: «Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering». – September 1-3, 2005, Portorož, Slovenia. - P. 91-97.

106. Carino, N. J., Sansalone, M., Hsu, N.: Flaw Detection in Concrete by Frequency Spectrum Analysis of Impact-Echo Waveforms, International Advances in Nondestructive Testing, V. 12, 1986, pp. 117-146.

107. Christian, U. Impact-Echo measurement on fresh and hardening concrete / U. Christian, H. Grosse, W. Reinhart, R. Beutel // Institute of Construction Materials, University of Stuttgart, 2003. – 6 p.

108. Castro1, P.F Assessing strength variability of concrete structural elements / P.F. Castro1, A. Mendes // The 8-th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing: «Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering». – September 1-3, 2005, Portorož, Slovenia. - P. 91-97.

109. DIN EN 13791-2009 Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen.

110. Gabor, D.: Theory of Communication, J. Inst. Electr. Eng. 93 (1946), pp. 429-457.

111. Kaiser, G.: A friendly Guide to Wavelets. Birkhäuser, 1994.

112. Kusák, I., Luňák, M., Impedanční spektroskopie samozhutitelného betonu, příspěvek na konferenci MVK 2009, ISBN 978-80-7204-629-4, CERM, Brno, 2009

113. Leonovich, S.N. Complex method of strength estimation of the monolithic reinforced concrete structures / S.N. Leonovich, D.U. Snezhkov // Concrete structures stimulators of development: proceedings of international FIB conference. – Dubrovnik, – 2007. - P. 947-954.

114. Leonovich S.N. Non-destructive control on object of monolithic construction / S.N. Leonovich., B.M. Khroustaliev., D.U. Snezhkov // XII Mezinárodní vědecká conference - International scientific confer-

ence; Sbornik příspěvků proceedings, 20-22 April, Brno, Czech Republic, 2009. – P. 212-215.

115. Matysik, M.; Plskova, I.; Korenska, M.; Kucharczykova, B. NDT of Mechanical Damaged Concrete Specimens by Nonlinear Acoustic Spectroscopy Method. TRANSACTIONS ON TRANSPORT SCIENCES. 2010. 2(4). p. 166 - 171. ISSN 1802-971X

116. Mikulić, D. Application of ultrasonic methods for early age concrete characterization / D. Mikulić, D. Sekulić, N. Štirmer, D. Bjegović // The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing: «Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering» - September 1-3, 2005, Portorož, Slovenia. - P. 99-108.

117. Pucinotti, R. The use of multiple combined non destructive testing in the concrete strength assessment: applications on laboratory specimens / R. Pucinotti // [Electronic resource], 2003. - Mode of access: [http://www.ndt.net/article/hsndtct2007/files/Pucinotti\\_Crisci\\_etat.pdf](http://www.ndt.net/article/hsndtct2007/files/Pucinotti_Crisci_etat.pdf). - Date of access: 02.02.2008.

118. Paris, O. Study of phased array techniques for concrete inspection / O. Paris, C. Poidevin, J.M. Rambach, G. Nahas // The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing: «Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering». - September 1-3, 2005, Portorož, Slovenia. - P. 11-17.

119. Polkar, R. The Wavelet Tutorial. <http://www.public.iastate.edu/~rpolikar> / WAVELETS/ WTacknowledgment.html, 1999.

120. RILEM draft recommendation, TC-43-CND. Combined non-destructive testing of concrete. Draft recommendation for in situ concrete strength determination by combined non-destructive methods. Materials and Structures, 1993. – P.43-49.

121. Runkiewicz, L. Application of the Ultrasonic and Sclerometric Methods for the Assessment of the Structures Made of High-Strength Concrete (HSC) / L. Runkiewicz, M. Runkiewicz // [Electronic resource], 2003. - Mode of access: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/>. - Date of access: 24.12.2007.

122. Samokrutov, A.A. Ultrasonic defectoscopy of concrete by means of pulse-echo technique / A.A. Samokrutov, V.N. Kozlov, V.G. Shevaldykin, I.A. Meleshko // 8<sup>th</sup> European conference for Non-Destructive Tensing. – Barcelona, 17-21 June, 2002. - 6 p.

123. Sansalone, M. "Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves" / M. Sansalone, J. Carino // Report NBSIR 86-3452, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, September 1986.

124. Schneider, U. Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit / U. Schneider, S. Huismann // Schriftenreihe des Institut für Hochbau und Technologie, Technische Universität Wien, , Heft 17, Auflage 2011, P. 240.

125. Shmidt E. A non-destructive concrete tester / E. Shmidt // Concrete. - 1951, 8. – P. 34.

126. Schickert, M. Ultraschall-Tomographie an Betonbauteilen / M. Schickert // DACH - Jahrestagung 2004 Salzburg. - [Electronic resource], 2004. - Mode of access: <http://www.ndt.net/article/dgzfp04/pdf>. - Date of access: 24.12.2007.

127. Schickert, M. Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique / M. Schickert, M. Krause, W. Müller // Journal of Materials in Civil Engineering №15. - 2003. – P.235–246.

128. Shkolnik, I. Nonlinear nondestructive methods for evaluating strength of concrete / H. Shkolnik, H. Aktan, R. Birgul // International Symposium (NDT-CE 2003) Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003 [Electronic resource], 2003. - Mode of access: <http://www.ndt.net/article/ndtct03/pdf>. - Date of access: 04.11.2007.

129. Solodov, I. Nonlinear ultrasonic NDT for early defect recognition and imaging / I. Solodov, N. Krohn, G. Busse // Institute of polymer technology, department of nondestructive testing (ikt-zfp), University of Stuttgart, Pfaffenwald Germany // [Electronic resource], 2010. - Mode of access: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/>. - Date of access: 24.03.2010.

130. Taffe, A Untersuchungen zum Einfluss der Karbonatisierungstiefe auf Ergebnisse der Rückprallhammerprüfung zur verbesserten Ermittlung der Betondruckfestigkeit / A.Taffe, S. Feistkorn, Ch. Ickert // DGZfP-Jahrestagung 2013 . P 1-8 [Electronic resource], 2013. - Mode of access: <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/> - Date of access: 04.11.2013.

131. Ten Cate J. A., Smith E., Guyer R. A. Universal Slow Dynamics in Granular Solids // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85(5). P. 1020-1023.

132. Tournat V., Gusev V., Zaitsev V., and B. Castagnede, Acoustic second harmonic generation with mode conversion in granular media: nonlinear transformation of the emitting antenna // *Europhys. Lett.*, 2004, V. 66(6), P. 798-804.

133. Zaitsev V., Nazarov V., Gusev V., Castagnede B. Novel nonlinear-modulation acoustic technique for crack detection // *NDT&E International*. 2006. V. 39, No 3. P. 184-194

134. Zaitsev V., Gusev V., Zaytsev Yu. Mutually induced variations in dissipation and elasticity for oscillations in hysteretic materials: non-simplex interaction regimes // *Ultrasonics*. 2005. V. 43. P. 699-709.

135. Zaitsev V., Gusev V. On the differences between “adhesion-type” and “friction-type” hysteresis: theoretical description and experimental indications / *CD-Proc. 8-eme Congrès Français d'Acoustique*, Tours, 2006, P. 513-516.

136. Zimmer, U. Quantitative Untersuchung zur Mikrorissigkeit aus akustischen Gesteinseigenschaften am Beispiel von Steinsalz und Anhydrit / U.Zimmer // *Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Naturwissenschaften Dr. rer. nat./ Technischen Universität Berlin*.2001 – 189. p

Таблица А.1 – Основные составы контролируемого бетона

№ п/п	Наименование состава	Обозначение состава	Марка по удобоукладываемости	Расход песка		Расход щебня		Расход цемента, кг ПЦ-500	Расход пластификатора л (кг)	
				кг	м <sup>3</sup>	кг	м <sup>3</sup>		Стакмент	Стакплагст-М
1	Бетон тяжелый Состав №1 *	C25/30 F100 W6	П13	750	0,5	1100	0,79	445	3,0 (3,6)	
2	Бетон тяжелый Состав №2 **	C35/45 F100	П14	710	0,47	1000	0,71	600	4,8 (4,1)	
3	Бетон тяжелый Состав №3 **	C30/37	П14	730	0,49	1050	0,75	540		5,4 (6,4)
4	Бетон тяжелый Состав №4 **	C35/45 F100	П14	700	0,47	1030	0,74	600		6,0 (7,1)

\*Вода на ОК = 13...15 см

\*\*Вода на ОК = 16...18 см (марка по удобоукладываемости П14)

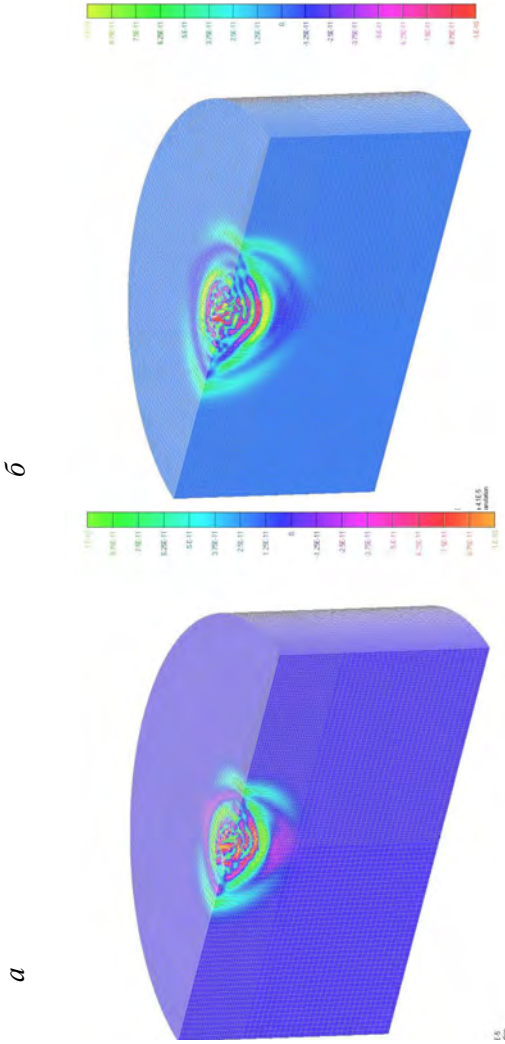


Рис. Б.1 – Визуализация волнового процесса в цилиндрической модели при его возбуждении тангенциальным импульсом в центре образца: *а* – для момента времени 32 мкс; *б* – для момента 41 мкс

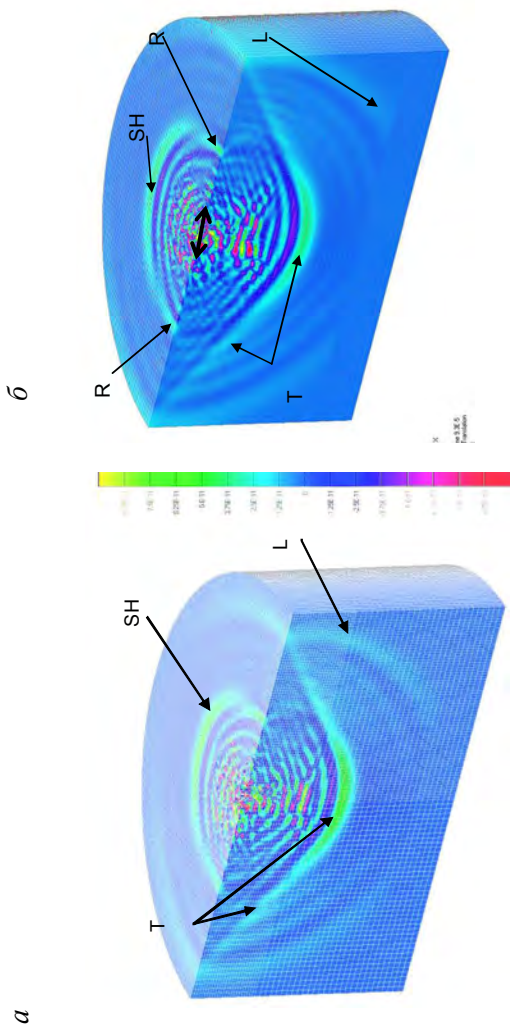


Рис. Б.2 – Визуализация волнового процесса в цилиндрической модели при его возбуждении тангенциальным импульсом в центре образца: *a* – для момента времени 84 мкс; *б* – для момента 93 мкс  
*(T – фронт объемной поперечной волны, L – фронт продольной волны, R – фронт волны Релея, SH – фронт поперечной волны поляризованной в плоскости модели, I – инициирующий вектор*



Результаты моделирования процесса распространения  
ультразвукового импульса в армированном образце

Таблица Б.1 – Коэффициенты нормирования (затухания)

Z, см	Z/Z <sub>0</sub>	$K_{Norm}$			
		$E2=20$ ГПа, $\nu2=0,2$		$E2=40$ ГПа, $\nu2=0,2$	
		$d=8$ мм	$d=16$ мм	$d=8$ мм	$d=16$ мм
2	0,5	0,5	0.8	0.8	0.7
4	1	1	1	1	1
6	1,5	1,2	1.1	1.5	1.2
8	2	2	1.4	2.5	1.5
10	2,5	3,5	1.8	4.2	2
12	3	6	2.4	7.5	2.7
14	3,5	9	3.1	14	3.7
16	4	18	4	24	5
18	4,5	30	5.3	44	6.7
20	5	50	6.5	84	9.3
24	6	150	11	250	17
28	7	420	19	730	31
32	8	1300	32	-	57
36	9	-	55	-	105

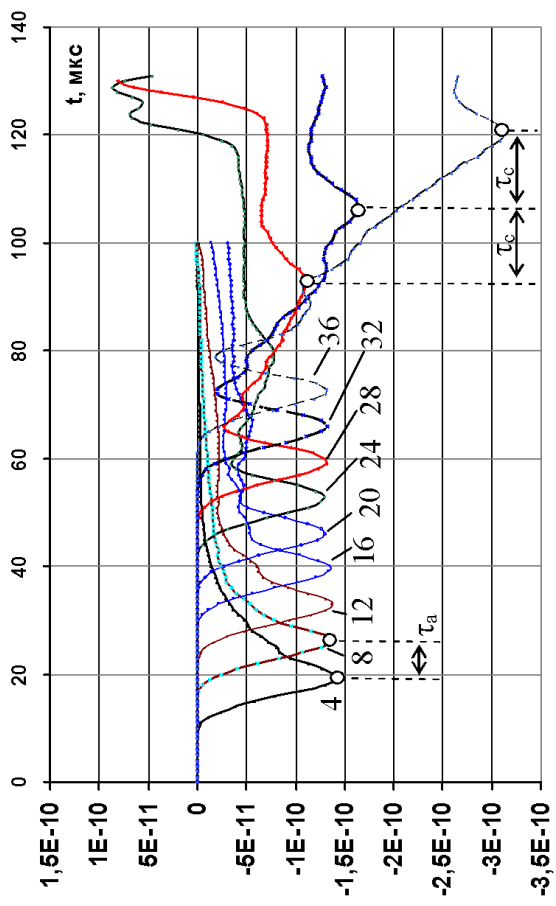


Рис. Б.3 – Временные диаграммы нормированного смещения узлов оси арматурного стержня КЭ модели армированного бетонного образца

Таблица В.1 – Данные испытаний бетонного пола с упрочняющим покрытием

№ точки	контр.	МП-10	МП-11	ПС-10	ПС-11	МП-12	ПС-12	СРЕДН.	ед.
№ отчетов ОМШ-1		1	2	3	4	5	6		
1		30	28	42	40	32	28		дел.
2		32	28	40	32	28	27		-
3		30	28	34	41	34	26		-
4		32	28	30	40	30	28		-
5		29	32	34	36	32	24		-
6		28	30	36	38	33	22		-
7		26	30	38	38	32	30		-
8		30	34	38	38		34		-
9		26	28		48*		28		-
10		26					28		-
средн. значение		28,90	29,56	36,50	37,88	31,57	27,50	31,98	-
Прочность f <sub>c</sub> , МПа		<b>31,4</b>	<b>32,8</b>	<b>48,6</b>	<b>52,1</b>	<b>37,1</b>	<b>28,7</b>	<b>38,4</b>	МПа
№ отчетов Бетон-тестер		1	2	3	4	5	6		
1		34,2	33,7	32,2	31,4	33,9	36,6		мкс.
2		35,2	33,6	33,0	31,5	33,4	36,5		мкс.
3		36,2	35,8	34,8	31,4	33,4	34,0		мкс.
4		36,5	34,7	31,6	31,9	33,6	35,0		мкс.
5		36,1	36,0	31,4	31,3	33,9	33,8		мкс.
6		34,1	33,2	32,2	31,5	35,2	32,2		мкс.
7		35,0	33,7	34,5	31,4		33,4		-
8			35,8	32,1			33,4		-
9							32,4		мкс.
10							39,6		-
средн. значение		35,33	34,56	32,73	31,49	33,90	34,61	33,77	мкс.
Прочность f <sub>c</sub> , МПа		<b>34,4</b>	<b>36,4</b>	<b>41,5</b>	<b>45,3</b>	<b>38,1</b>	<b>36,2</b>	<b>38,7</b>	МПа
ИПС-4МГ		65	69,6	85,1	69,4	63,3	58,3		МПа
		64,6	66,7	84,9	69	65,2	65		МПа
Прочность (ср. значение)		<b>64,8</b>	<b>68,2</b>	<b>85,0</b>	<b>69,2</b>	<b>64,3</b>	<b>61,7</b>	<b>65,5</b>	МПа



Рис. В.1 – Нанесение упрочняющего покрытия бетонного пола

## Результаты испытаний бетона монолитных колонн жилого дома комплексным неразрушающим методом

Таблица В.2 - Составы бетона

Наименование состава, (усл. № состава)	Обозначение состава	Марка по удобоукладываемости	Расход песка		Расход щебня		Расход цемента, (ПЦ-500), кг
			кг	м <sup>3</sup>	кг	м <sup>3</sup>	
Бетон тяжелый (состав №5 )	C32/40	ПЗ	720	0,48	1050		573

- Общее количество обследуемых колонн – 40;
- Возраст бетона колонн – более 150 суток;

Используемые методы и приборы неразрушающих испытаний прочности бетона:

- Ультразвуковой импульсный метод – бетон-тестер УК1401 зав. №401214, «Пульсар» 1,1 зав. №316
- Упругого отскока (склерометр Шмидта ОМШ-1 зав. № 1020)
- Ударного импульса (ИПС-МГ4.01 зав. № 2439) .;
- Отрыва со скалыванием (ПОС-30МГ4»Скол») по ГОСТ 22690-88.

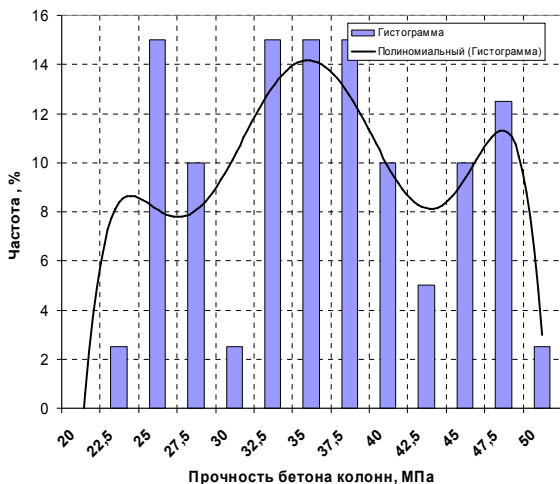


Рис. В.2 - Гистограмма распределения числа колонн по прочности бетона



Рис. В.3 – Усиление колонны, не обеспечившей проектных показателей прочности, стальным бандажом

Таблица Г.1 – Данные измерений серии ВВ

База, см	$t_{0,L}$ , мкс	$t_{3,1}$ , мкс	$t_{3,2}$ , мкс	$\tau_{1,L}$ , мкс	$t_{0,R}$ , мкс	$\tau_{1,R}$ , мкс
25	56	92			114.5	
50	110	150	196	44	220	69
75	169	210	289	117	326	92
100	221	268	358	87	431	94
125	284	326	436	108	538	100
150	338	380	522	92	641	104
175	392	438	500	78	743	

Таблица Г.2 – Данные измерений серии ТВ

База, см	$t_{0,L}$ , мкс	$t_{3,1}$ , мкс	$t_{3,2}$ , мкс	$\tau_{1,L}$ , мкс	$t_{0,R}$ , мкс	$\tau_{1,R}$ , мкс
25	65	104	**	**	124	**
50	123	164	**	62	230	**
75	178	220	280/262	71	335	**
100	239	277	382/368	91	442	**
125	300*	347	**	**	543	85
150	345*	390	455	85	650	**
175	400*	445	**	137	750	**

Таблица Г.3 – Данные измерений серии ТТ

База, см	$t_{0,L}$ , мкс	$t_{3,1}$ , мкс	$t_{3,2}$ , мкс	$\tau_{1,L}$ , мкс	$t_{0,R}$ , мкс	$\tau_{1,R}$ , мкс
25	74	112	**	**	133	**
50	132	172	219	73	238	**
75	190*	230	**	**	347	57
100	246*	288	**	**	450	106
125	300*	342	**	**	550*	75
150	352*	402	**	**	660	107
175	**	457	**	**	762	60

\* - неоднозначность в оценке параметра (принято меньшее значение);

\*\* - отсутствие признаков сигнала

## Временные диаграммы акустического сигнала серии ВВ

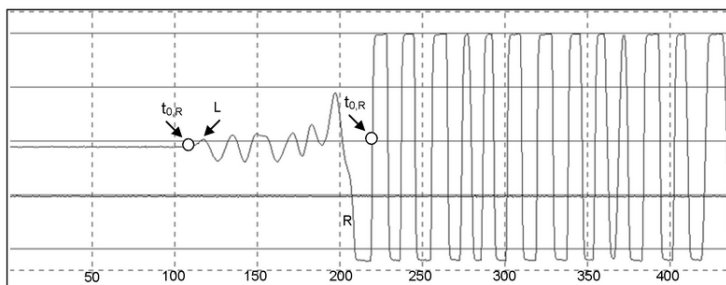


Рис. Г.1 – Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 50 см с использованием вязкого акустического контакта ЭАП: отметки по горизонтальной оси – в микросекундах, масштаб вертикальной оси – 0,5 В/деление

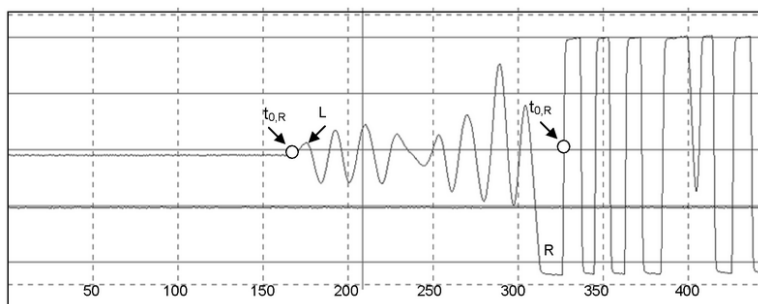


Рис. Г.2 – Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 75 см с использованием вязкого акустического контакта ЭАП: отметки по горизонтальной оси – в микросекундах, масштаб вертикальной оси – 0,5 В/деление

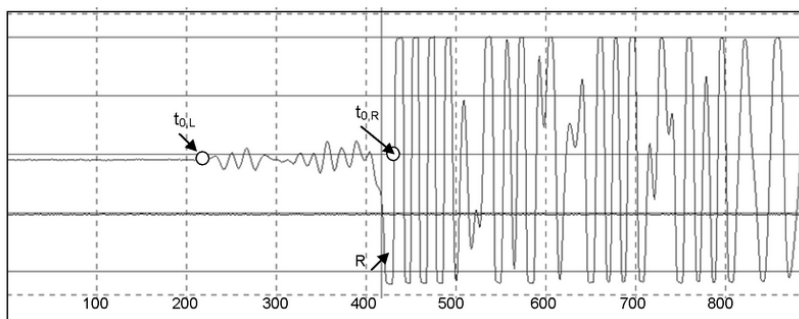


Рис. Г.3 – Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 100 см с использованием вязкого акустического контакта ЭАП: отметки по горизонтальной оси – в микросекундах, масштаб вертикальной оси – 0,5 В/деление

## Временные диаграммы акустического сигнала серии ТВ

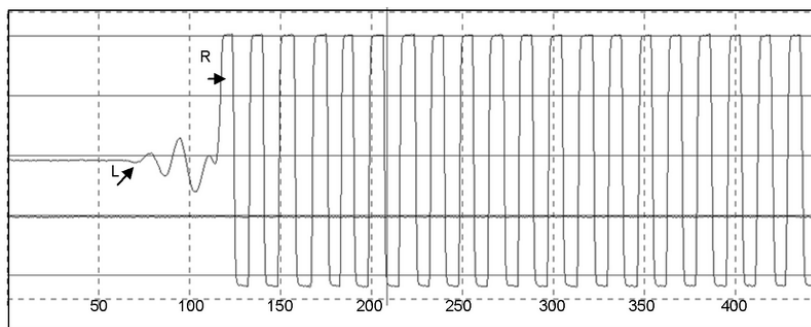


Рис. Г.4 – Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 25 см с использованием вязкого и сухого точечного акустического контакта ЭАП: отметки по горизонтальной оси – в микросекундах, масштаб вертикальной оси – 0,5 В/деление

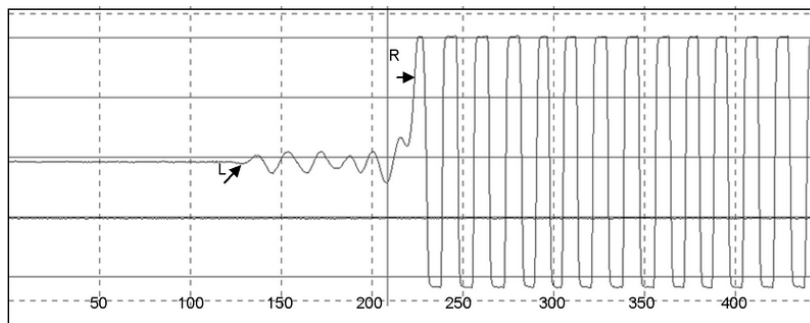


Рис. Г.5 – Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 50 см с использованием вязкого и сухого точечного акустического контакта ЭАП: отметки по горизонтальной оси – в микросекундах, масштаб вертикальной оси – 0,5 В/деление



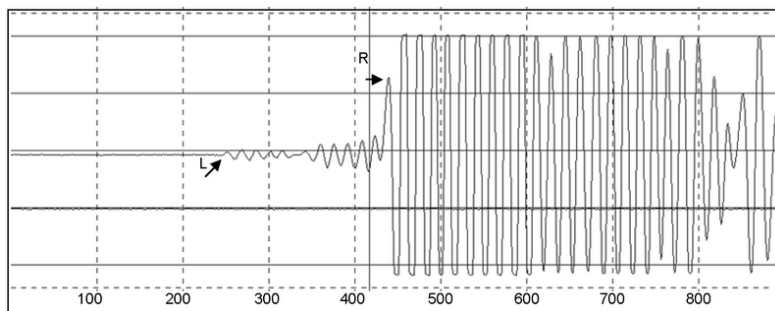


Рис. Г.6 – Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 100 см с использованием вязкого и сухого точечного акустического контакта ЭАП: отметки по горизонтальной оси – в микросекундах, масштаб вертикальной оси – 0,5 В/деление

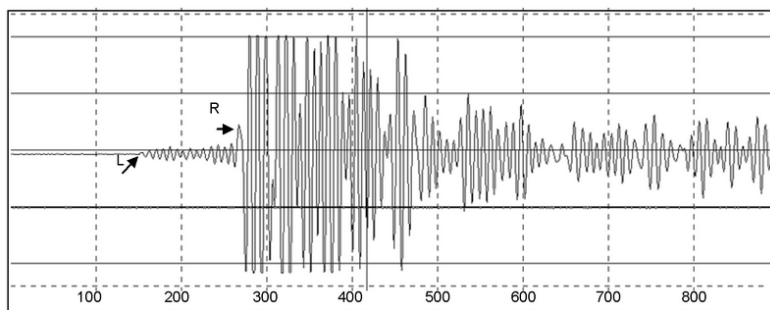


Рис. Г.7 – Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 25 см с использованием вязкого и сухого точечного акустического контакта ЭАП: отметки по горизонтальной оси – в микросекундах, масштаб вертикальной оси – 0,5 В/деление

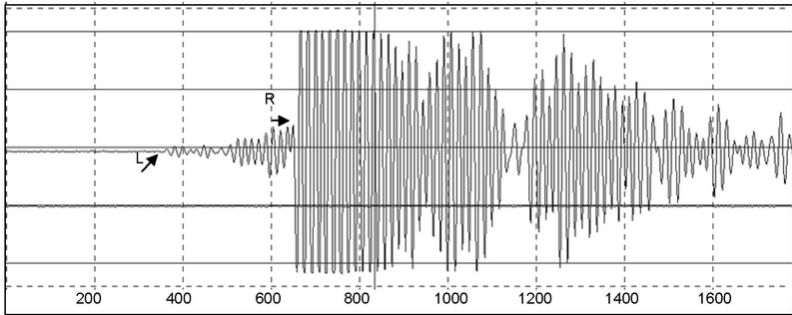


Рис. Г.8 – Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 150 см с использованием вязкого и сухого точечного акустического контакта ЭАП: отметки по горизонтальной оси – в микросекундах, масштаб вертикальной оси – 0,5 В/деление

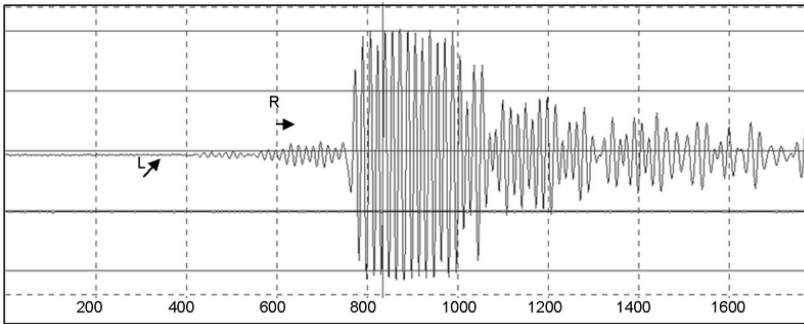


Рис. Г.9 – Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 175 см с использованием вязкого и сухого точечного акустического контакта ЭАП: отметки по горизонтальной оси – в микросекундах, масштаб вертикальной оси – 0,5 В/деление

## Временные диаграммы акустического сигнала серии ТТ

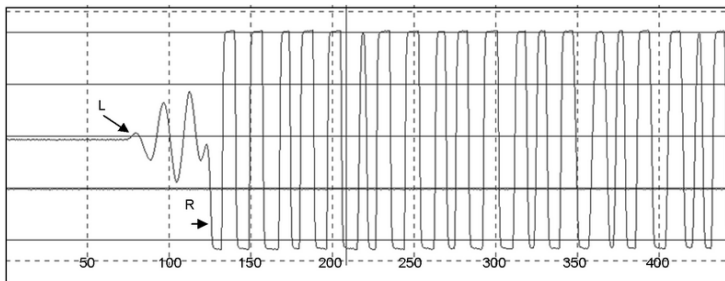


Рис. Г.10 – Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 25 см с использованием сухого точечного акустического контакта ЭАП: отметки по горизонтальной оси – в микросекундах, масштаб вертикальной оси – 0,5 В/деление

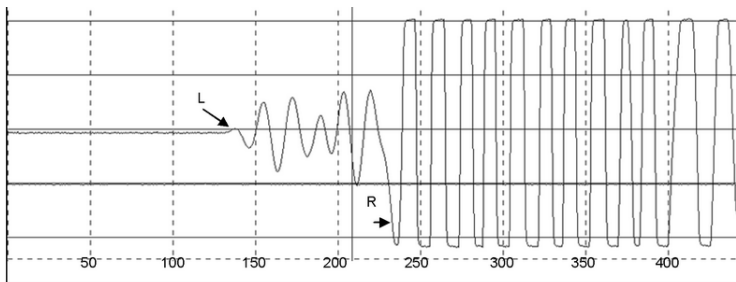


Рис. Г.11 – Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 50 см с использованием сухого точечного акустического контакта ЭАП: отметки по горизонтальной оси – в микросекундах, масштаб вертикальной оси – 0,5 В/деление

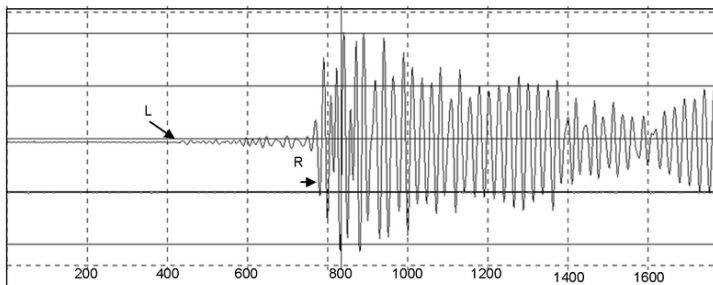


Рис. Г.12 – Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 175 см с использованием сухого точечного акустического контакта ЭАП: отметки по горизонтальной оси – в микросекундах, масштаб вертикальной оси – 0,5 В/деление

Таблица Д.1 – Основные технические характеристики инклинометров

<i>Наименование характеристики</i>	<i>Значение</i>	
<b>Модель инклинометра</b>	CMS-2D-C	CMS-2D-R
Количество осей (каналов) измерения	2	2
Тип подключения	кабельный	радио
Полный измеряемый диапазон	±15°	
Разрешающая способность, аналоговая	0,001 (3,6")°	
Разрешающая способность, цифровая, бит	16	
Абсолютная погрешность	±1,8"	
Относительная погрешность	0,075°	
Нелинейность характеристики в рабочем диапазоне частот	±0,057°	
Время готовности к измерениям, по включению прибора, сек, не более	5	1 цикл самотестирования
Средняя наработка на отказ, ч	25 000	
Долговременная стабильность, менее	0,004	
Долговременная температурная стабильность, %/°C:		
– без компенсации	0,013	
– с компенсацией	0,005	
Рабочий диапазон температур, °C	от – 40 до + 125	
Диапазон измеряемых температур встроенным датчиком, °C	от – 60 до + 125	
Разрешающая способность, °C:		
– без калибровки	0,5	
– при калибровке по 3 точкам	0,2	
Относительная влажность при эксплуатации, %, не более	95	
Электрическая изоляция корпуса от внешних устройств, Ом, не менее	1 010	
Коммуникационный протокол	RS 485	
Напряжение питания по кабелю от базовой станции, В	+24В	
Габаритные и присоединительные размеры, мм, не более:		
– длина	160	
– ширина	106,5	
– высота	85	
Масса, кг, не более	0,99	
Устойчивость к ударным воздействиям, g	20 000	

Таблица Д.2 – Основные технические характеристики автоматизированной системы мониторинга

Наименование характеристики	Значение
Модель автоматизированной системы мониторинга	AKKE CMS-100-GE
Емкость автоматизированной системы мониторинга (максимально возможное количество подключаемых сенсоров), шт.	100
Напряжение питания, В, АС	90 – 265
Потребляемая мощность, Вт, не более	70
Число сегментов для подключения сенсоров, шт.	2
Дополнительные, потенциально нейтральные выходы, шт.	4
Входы расширения, шт.	2
Средняя наработка на отказ, ч	25 000
Поддерживаемые протоколы связи с внешними устройствами	USB for a memory stick RS232/RS485 Internet, Ethernet, GPRS
Протоколы обмена данными с сенсорами, роутерами	2×(RS485,+24В)
Рабочий диапазон температур, °С	от – 40 до + 60
Габариты, мм, в том числе: – длина (с элементами крепления) – ширина (с элементами крепления) – глубина (с элементами крепления и крышкой)	323 237 96
Масса, кг, не более	2,52

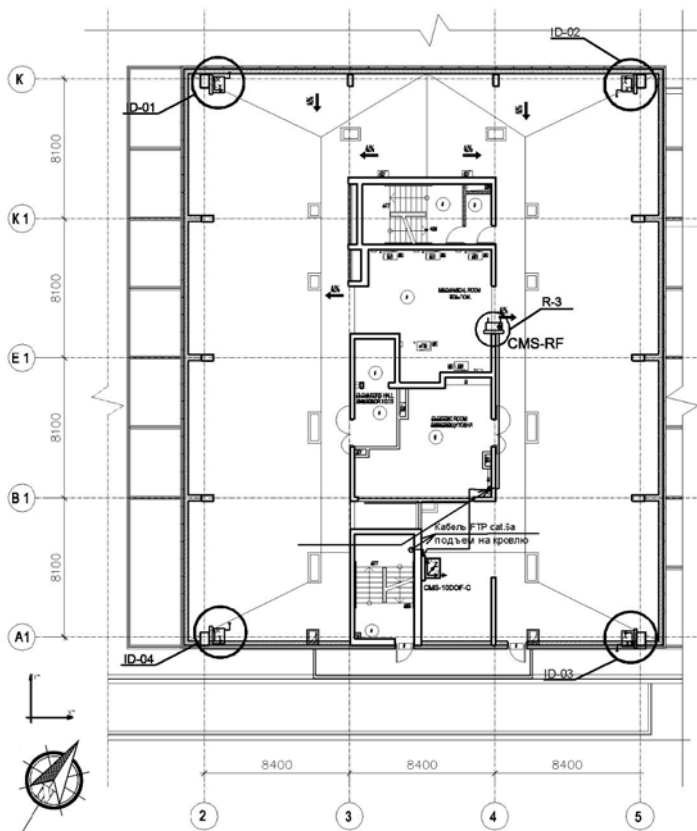


Рис. Д.1 – Расположение сенсоров ID-1..ID-4 типа CMS-2D-R и акселерометра CMS-10DOF-C в высотной части здания (в плане 21 технического этажа)

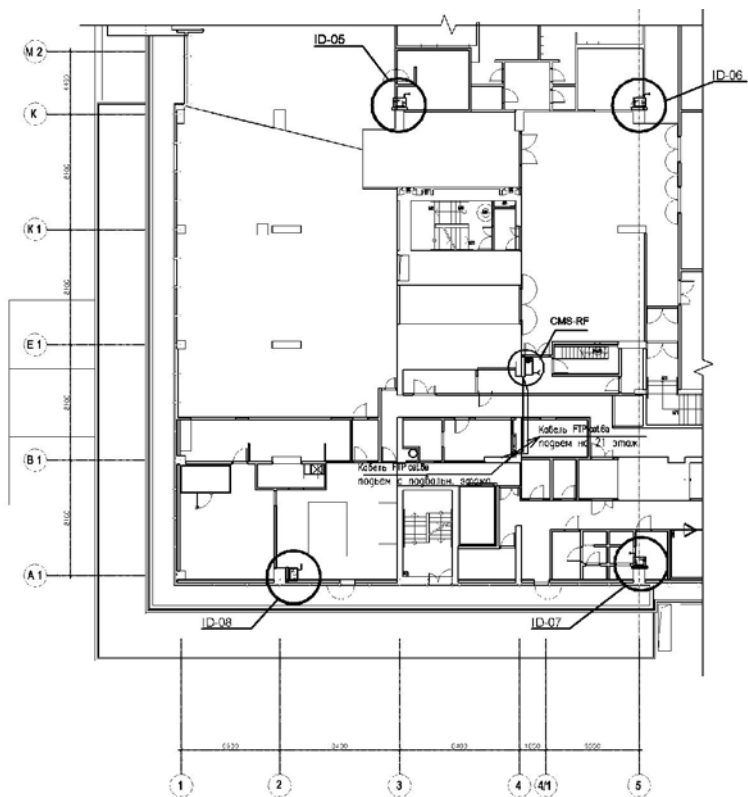


Рис. Д.2 – Расположение сенсоров ID-5...ID-8 (CMS-2D-R) в плане оборудования 7 этажа: на фото показан датчик ID-07

Таблица Д.3 – Фрагмент файла данных с суточным разрешением сенсора ID-02

Дата	Время	Гор (X) [°]	Вер (Y) [°]	Температура [°C]
13.01.2016	0:00	0,006	-0,022	6,8
14.01.2016	0:00	0,005	-0,022	6,6
15.01.2016	0:00	0,005	-0,021	6,8
16.01.2016	0:00	0,005	-0,021	7,4
17.01.2016	0:00	0,006	-0,02	7,9
18.01.2016	0:00	0,006	-0,019	7
19.01.2016	0:00	0,006	-0,019	7,4
20.01.2016	0:00	0,006	-0,018	8
21.01.2016	0:00	0,006	-0,019	7,8
22.01.2016	0:00	0,004	-0,019	7,8
23.01.2016	0:00	0,003	-0,019	7,7
24.01.2016	0:00	0,004	-0,02	7,2
25.01.2016	0:00	0,003	-0,02	6,8

ID-02  
(#10)

Таблица Д.4 – Фрагмент файла данных с часовым разрешением сенсора ID-02

Дата	Время	Гор(X) [°]	Вер(Y) [°]	Температура [°C]
24.01.2016	17:00	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	18:00	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	19:00	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	20:00	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	21:00	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	22:00	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	23:00	0,003	-0,02	6,9
25.01.2016	0:00	0,003	-0,02	6,9
25.01.2016	1:00	0,003	-0,02	6,9
25.01.2016	2:00	0,003	-0,02	6,9
25.01.2016	3:00	0,003	-0,02	6,9
25.01.2016	4:00	0,003	-0,02	6,9
25.01.2016	5:00	0,003	-0,02	6,9

ID-02  
(#10)

Таблица Д.5 – Фрагмент файла данных с 10-минутным разрешением сенсора ID-02

Дата	Время	Гор(X) [°]	Вер(Y) [°]	Температура [°C]
24.01.2016	18:45	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	18:55	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	19:05	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	19:16	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	19:26	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	19:36	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	19:46	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	19:56	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	20:06	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	20:16	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	20:26	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	20:36	0,003	-0,02	6,9
24.01.2016	20:46	0,003	-0,02	6,9

ID-02  
(#10)



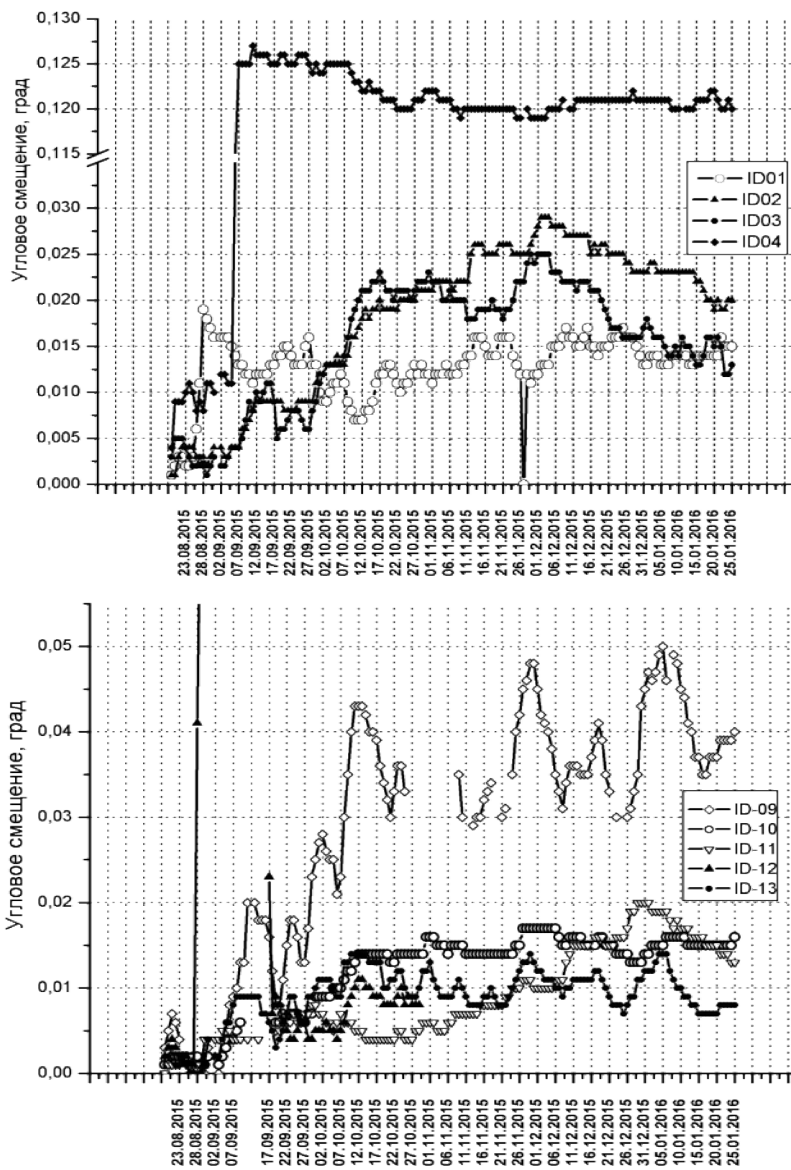


Рис. Д.3 – Угловые смещения колонн 21 и подвального этажей

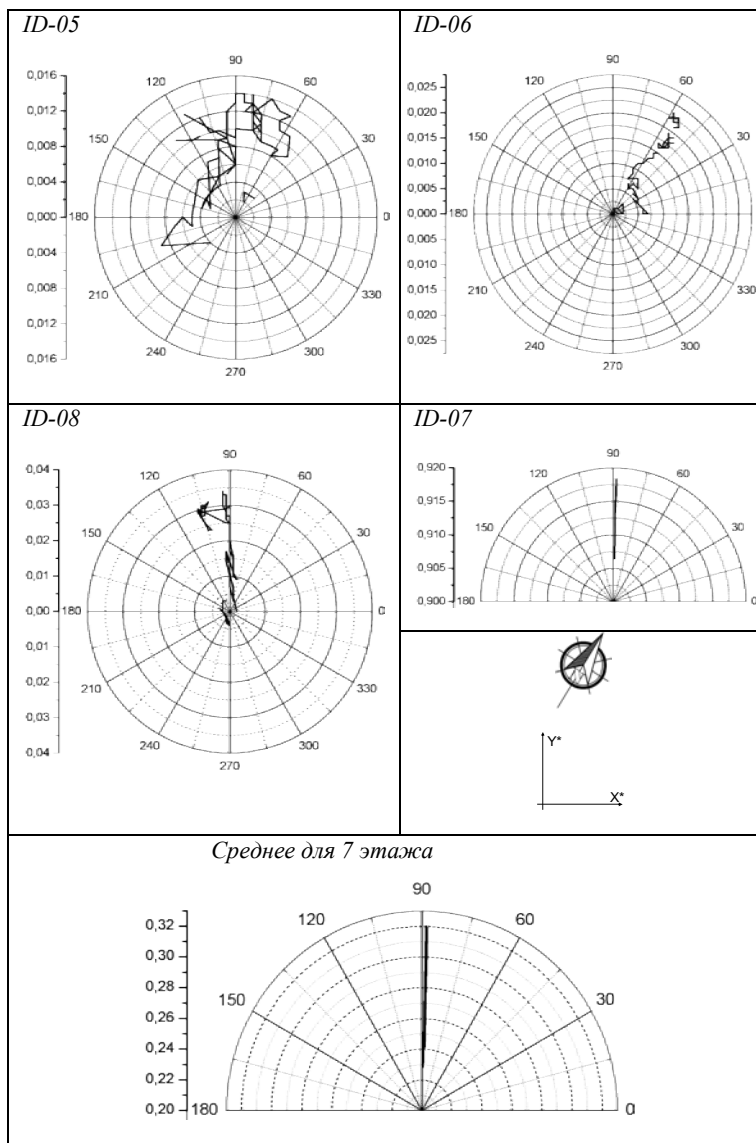


Рис. Д.4 – Годографы векторов угловых перемещений инклинометров 7 этажа здания за период с 02.09.2015 г. по 25.01.2016 г.

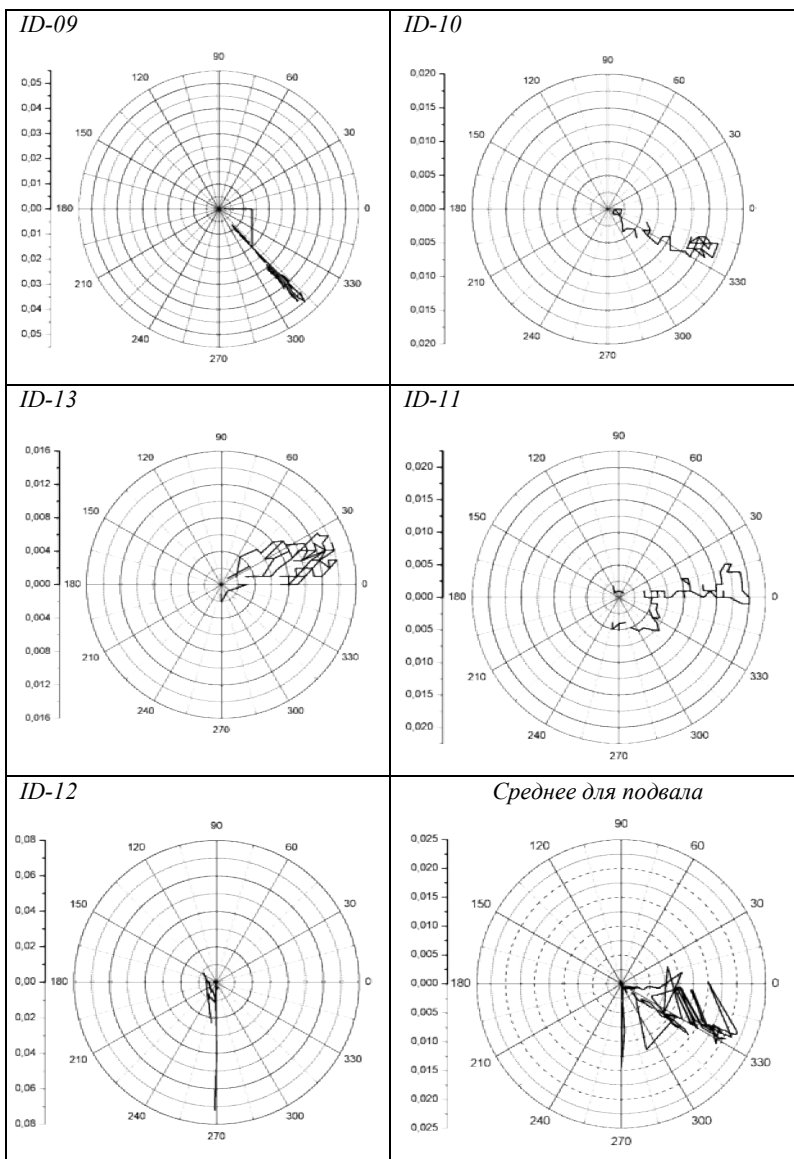


Рис. Д.5 – Годографы векторов диаграммы угловых перемещений инклинометров подвального этажа здания за период с 02.09.2015 г. по 25.01.2016 г.

Таблица Д.6 – Коэффициенты взаимной корреляции угловых отклонения колонн 7 этажа здания и их корреляции с температурой

		ID-05			ID-06			ID-07			ID-08		
		X*	Y*	mod	X*	Y*	mod	X*	Y*	mod	X*	Y*	mod
ID-05	X*		<b>-1,000</b>		<b>-1,000</b>	<b>-0,998</b>	1,000	<b>-0,779</b>	<b>-0,920</b>	0,584	<b>-1,000</b>	<b>-0,998</b>	0,989
	Y*				<b>1,000</b>	<b>0,999</b>	-1,000	<b>0,785</b>	<b>0,926</b>	-0,582	<b>1,000</b>	<b>0,998</b>	-0,989
	mod				-1,000	-0,999	1,000	-0,780	-0,922	0,581	-1,000	-0,988	0,989
ID-06	X*	<b>-1,000</b>	<b>1,000</b>	-1,000		<b>0,999</b>		<b>0,789</b>	<b>0,926</b>	-0,585	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	-1,000
	Y*	<b>-0,998</b>	<b>0,999</b>	-0,999				<b>0,798</b>	<b>0,932</b>	-0,580	<b>0,999</b>	<b>1,000</b>	-0,988
	mod	1,000	-1,000	1,000				-0,777	-0,918	0,611	-1,000	-0,989	1,000
ID-07	X*	<b>-0,779</b>	<b>0,785</b>	-0,780	<b>0,789</b>	<b>0,798</b>	-0,777		<b>0,948</b>		<b>0,782</b>	<b>0,794</b>	-0,775
	Y*	<b>-0,920</b>	<b>0,926</b>	-0,922	<b>0,926</b>	<b>0,932</b>	-0,918				<b>0,923</b>	<b>0,929</b>	-0,918
	mod	0,584	-0,582	0,581	-0,585	-0,580	0,611				-0,582	-0,575	0,589
ID-08	X*	<b>-1,000</b>	<b>1,000</b>	-1,000	<b>1,000</b>	<b>0,999</b>	-1,000	<b>0,782</b>	<b>0,923</b>	-0,582		<b>0,997</b>	
	Y*	<b>-0,998</b>	<b>0,998</b>	-0,998	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>	-0,989	<b>0,794</b>	<b>0,929</b>	-0,575			
	mod	0,989	-0,989	0,989	-1,000	-0,998	1,000	-0,775	-0,918	0,589			
Температура		<b>0,439</b>	<b>-0,465</b>	0,461	<b>-0,554</b>	<b>-0,579</b>	0,532	<b>-0,560</b>	<b>-0,645</b>	-0,111	<b>-0,501</b>	<b>-0,512</b>	0,485

Таблица Д.7 – Коэффициенты взаимной корреляции угловых отклонения колонн подвала здания и их корреляции с температурой

		ID-09			ID-10			ID-11			ID-12			ID-13		
		X*	Y*	mod	X*	Y*	mod	X*	Y*	mod	X*	Y*	mod	X*	Y*	mod
ID-09	X*		<b>-0,969</b>		<b>0,915</b>	<b>-0,877</b>	0,929	<b>0,767</b>	<b>0,637</b>	0,686	-0,008	0,012	-0,129	<b>0,883</b>	0,172	0,840
	Y*				<b>-0,945</b>	<b>0,882</b>	-0,955	<b>-0,772</b>	<b>-0,607</b>	-0,684	0,119	-0,002	0,096	<b>-0,882</b>	-0,137	-0,829
	mod				0,936	-0,890	0,949	0,774	0,627	0,689	-0,054	0,011	-0,120	0,895	0,162	0,847
ID-10	X*	<b>0,915</b>	<b>-0,945</b>	0,936		<b>-0,832</b>		<b>0,710</b>	<b>0,649</b>	0,607	-0,398	0,028	-0,076	<b>0,802</b>	-0,011	<b>0,726</b>
	Y*	<b>-0,877</b>	<b>0,882</b>	-0,890				-0,449	-0,377	-0,350	0,232	-0,043	0,120	<b>-0,947</b>	-0,438	<b>-0,928</b>
	mod	<b>0,929</b>	<b>-0,955</b>	0,949				0,689	0,623	0,585	-0,368	0,029	-0,085	0,841	0,056	0,772
ID-11	X*	<b>0,767</b>	<b>-0,772</b>	0,774	<b>0,710</b>	-0,449	0,689			0,524	-0,374	0,165	-0,198	0,526	-0,191	0,452
	Y*	<b>0,637</b>	<b>-0,607</b>	0,627	<b>0,649</b>	-0,377	0,623				0,493	-0,316	0,177	0,350	-0,389	0,261
	mod	0,686	-0,684	0,689	0,607	-0,350	0,585				-0,540	0,379	-0,324	0,436	-0,192	0,372
ID-12	X*	-0,008	0,119	-0,054	-0,398	0,232	-0,368	-0,374	0,493	-0,540		<b>-0,332</b>		-0,181	-0,138	-0,157
	Y*	0,012	-0,002	0,011	0,028	-0,043	0,029	0,165	-0,316	0,379				0,051	0,040	0,066
	mod	-0,129	0,096	-0,120	-0,076	0,120	-0,085	-0,198	0,177	-0,324				-0,139	-0,109	-0,158
ID-13	X*	<b>0,883</b>	<b>-0,882</b>	0,885	<b>0,802</b>	<b>-0,947</b>	<b>0,841</b>	0,526	0,350	0,436	-0,181	0,051	-0,138		<b>0,525</b>	
	Y*	0,172	-0,137	0,162	-0,011	-0,438	0,056	-0,191	-0,389	-0,192	-0,138	0,040	-0,109			
	mod	0,840	-0,829	0,847	0,726	-0,828	0,772	0,452	0,261	0,372	-0,157	0,056	-0,158			
Температура		<b>-0,975</b>	<b>0,962</b>	<b>-0,979</b>	<b>-0,987</b>	<b>0,869</b>	<b>-0,997</b>	<b>-0,638</b>	<b>-0,777</b>	-0,529	0,244	0,011	0,083	<b>-0,877</b>	-0,048	<b>-0,749</b>

В соответствии с запросом о возможности температурного дрейфа показаний сенсоров, в период с 23.11.2015 по 25.11.2015 года в лаборатории компании Tieto-Oskari<sup>7</sup> был проведен поверочный тест. Поверяемый сенсор – инклинометр, модели CMS-2D-C, серийный номер 40104432.

*Оборудование, использованное при тестировании:*

1. Температурная камера Discovery Pro (Италия).

Сертификат калибровки Vaisala PTU200, SN Y5130001, с прослеживаемостью в национальных стандартах давления, влажности и температуры

Технические характеристики.

Диапазон температур -80 - +125С°;

Диапазон относительной влажности – 10 -90%.

Программное управление скорость нарастания / снижения температуры, влажности.

2. Поверочный инклинометр CLINO 2000 (Швейцария).

Допущен в качестве эталона. VTT - центр стандартизации и метрологии Финляндии. Сертификаты калибровки M-15P063 (2012 год) и M-15H032 (2015 год) MIKES.

***Параметры тестирования:***

### **Тест 1**

Минимальная температура: -45С°

Максимальная температура: +75С°

Постоянная относительная влажность – 10%Rh

Скорость нарастания и снижения температуры: переменная в каждом цикле, от 0,2С°/мин до 2,5С°/мин.

---

<sup>7</sup> Tel. +358 – (0)8 – 6330480 Fax +358 – (0)8 – 622 644 GSM +358 – (0)500 – 692 773  
Internet: <http://www.tieto-oskari.com>, E-mail: [contact@tieto-oskari.com](mailto:contact@tieto-oskari.com)  
Alv rek, Kaupparekisterinumero 520.588, Kotipaikka KAJAANI

## Тест 2

Минимальная температура:  $-45^{\circ}\text{C}$

Максимальная температура:  $+75^{\circ}\text{C}$

Постоянная относительная влажность – 85%Rh

Скорость нарастания и снижения температуры: переменная в каждом цикле, от  $0,2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  до  $2,5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ .

### *Результаты тестирования*

1. При проведении тестирования во всем диапазоне температур на минимальной скорости ( $0,2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ) результаты теста показали, что изменение температуры на каждый 40 градусов Цельсия вызывают изменение показаний тестируемого инклинометра в  $\pm 0,001^{\circ}$ .

Расхождений в показаниях между тестируемым инклинометром и поверочным не обнаружено во всем диапазоне температур.

2. При проведении тестирования во всем диапазоне температур на максимальной скорости ( $2,2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ) результаты теста показали, что максимальный зарегистрированный краткосрочный температурный дрейф составил  $0,003^{\circ}$ . Однако при выдержке для стабилизации температуры, через каждые  $10^{\circ}\text{C}$ , дрейф показаний возвращается к значениям  $0,001^{\circ}$ .

Измеренная неопределенность результатов тестирования:

Показания относительной неопределенности тестируемого инклинометра  $u(x \text{ dut}) = 3 \%$ .

Неопределенность результатов теста дана при значениях  $k = 2$ , что соответствует 95 % уровня доверия. Неопределенности измерений были оценены в соответствии с инструкцией Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 100:2008).

### *Заклучение*

Проведенные тесты позволяют сделать вывод о том, что отмеченный дрейф в показаниях всех сенсоров в  $0,01 - 0,02^{\circ}$  при шаге изменения температуры в  $6^{\circ}\text{C}$  не связан с температурным дрейфом показаний сенсоров.

Научное издание

**Снежков** Дмитрий Юрьевич  
**Леонович** Сергей Николаевич

**МОНИТОРИНГ ВОЗВОДИМЫХ И ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ**

Подписано в печать 18.04.2016. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 19,24. Уч.-изд. л. 15,05. Тираж 100. Заказ 224.

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.