

7. КОНТРОЛЬ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ

Неразрушающий контроль бетона включает в себя две взаимосвязанные составляющие:

- оценку физико-механических свойств бетона, в первую очередь его прочности неразрушающими методами;
- выявление и оценку размеров и мест локализации скрытых дефектов, так называемая дефектоскопия бетона.

Методы неразрушающего контроля прочности бетона относятся к прогнозирующим методам. Это означает, что их оценка может отличаться со значительной вероятностной составляющей от «кубиковой» – прессовой оценки прочности бетона. Это обусловлено в первую очередь различием условий «работы» бетона в зонах локального воздействия при неразрушающих испытаниях и в разрушаемом прессом образце.

Во-вторых, значительное влияние на точность контроля, особенно в построчных условиях, оказывают технологические факторы, изменчивость которых в разной степени проявляет себя на соотношении показателей прочности и упругости бетона и, как следствие, – «кубиковой» – прессовой прочности бетона и косвенных параметрах неразрушающих методов.

Использование комплексного, взаимодополняющего учета оценок нескольких неразрушающих методов, обладающих разной чувствительностью к изменению прочности и упругости бетона, позволяет повысить надежность их оценок.

Дефектоскопия бетона получила в настоящее время сильный толчок в своем развитии. Обусловлено это в первую очередь появлением эффективных приборных средств – акустических и радиоволновых дефектоскопов. Методы акустической дефектоскопии бетона в значительной степени «заимствованы» из дефектоскопии металлических конструкций. Но крупнодисперсная структура бетона создает специфические проблемы при обнаружении дефектов в массиве, затрудняя использование коротковолновых (высокочастотных) зондирующих сигналов, что снижает эффективность контроля.

Развитию приборной базы и методик контроля способствуют растущие требования к качеству выполнения бетонных работ, особенно с использованием тонкостенных конструкций из высокопрочных бе-

тонов. Возможность многократного проведения испытаний конструкции или ее фрагмента неразрушающими методами на различных участках позволяет получить детальную картину расположения зон бетона с пониженными прочностными показателями.

Термографический метод с использованием тепловизионных систем применяется при обследовании зданий, сооружений, тепловых сетей на предмет выявления и оценки потерь тепла. Известен положительный опыт использования тепловизоров для выявления поверхностных дефектов бетонных конструкций¹.

На рисунке 7.1 хорошо видны зоны потерь тепла через перекрытие.

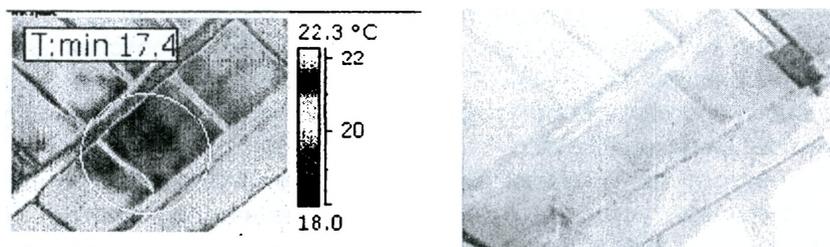


Рисунок 7.1— Тепловизионное и обычное изображения кровли с дефектом утепления

7.1. Механические методы контроля прочности бетона

Неразрушающие методы контроля прочностных показателей бетона обычно классифицируются как механические и физические. К механическим относится группа методов локального разрушения бетона и группа склерометрических методов, основанных на взаимодействии твердого индентора (ударника) с поверхностью контролируемой конструкции. В первую очередь к физическим методам относят акустические методы и ряд электрофизических методов. Они, в свою очередь, подразделяются на пассивные, основанные на регист-

¹ Контролируемый участок (несколько квадратных метров) поверхности бетона подвергается облучению мощной ксеноновой лампы, после чего производится его наблюдение в ИК диапазоне. Участки бетона, под которыми имеются скрытые дефекты, будут отличаться температурой своей поверхности от соседних бездефектных участков.

рации сигналов, возникающих в контролируемом изделии, например, при деформации (метод акустической эмиссии); и активные, в частности, ультразвуковой импульсный метод, эхо-ударный (Impact Echo) метод, метод электромагнитного отклика, радиоволновые методы.

Все неразрушающие методы являются *технологозависимыми*, что требует их адаптация под используемую технологию бетона подбором соответствующих градуировочных зависимостей. В наибольшей степени технологозависимыми методами являются низкоэнергетические методы: ультразвуковой импульсный, метод свободных колебаний, ударного импульса. В меньшей степени – метод упругого отскока и пластической деформации.

Практически не подвержены влиянию нестабильности технологии бетона методы локального разрушения: методы отрыва и скалывания по ГОСТ 22690-88 и метод определения прочности по образцам, отобраным из испытываемой конструкции по ГОСТ 28570-90.

Методы локального разрушения бетона: отрыв со скалыванием и скалывания ребра

Физической основой этой группы методов является относительно небольшое разрушение поверхностной зоны контролируемого изделия. Оценка прочности бетона на сжатие производится по усилию вырывания анкера (см. рис. 7.2, 7.3, 7.4), установленного в высверленное в бетоне глухое отверстие - шпур, в соответствии с формулой

$$f_{c,cube} = m_1 \cdot m_2 \cdot P, \text{ МПа}, \quad (7.1)$$

где m_1 – коэффициент, учитывающий максимальный размер крупного заполнителя в зоне вырыва и принимаемый равным 1 при крупности менее 50 мм и 1,1 – при крупности 50 мм и более; m_2 – коэффициент пропорциональности для перехода от усилия вырыва к прочности бетона; P – сила вырыва анкерного устройства, кН.

Для метода скалывания ребра (рис. 7.3) прочность бетона определяется по формуле

$$f_{c,cube} = 0,058 \cdot m \cdot (30P + P^2), \text{ МПа}, \quad (7.2)$$

где m – коэффициент, учитывающий максимальный размер крупного заполнителя и принимаемый равным 1 при крупности заполните-

ля менее 20 мм; 1,05 – при крупности заполнителя от 20 до 30 мм и 1,1-при крупности от 30 до 40 мм; P – сила скалывания, кН.

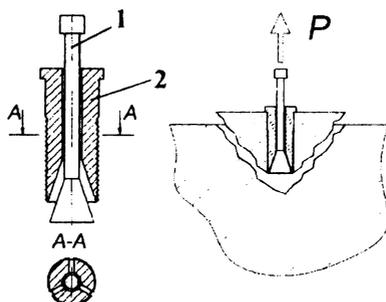


Рисунок 7.2 – Схема отрыва со скалыванием; конструкция анкера:
1 – рабочий стержень с разжимным конусом; 2 – сегментные рифленные щеки

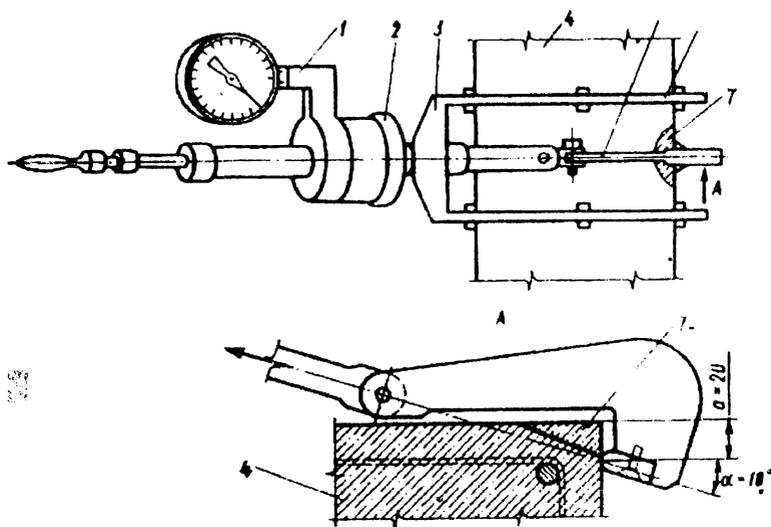


Рисунок 7.3 – Схема скалывания ребра:
1 – прибор ГПНС-4, 2 – муфта, 3 – рама, 4 – испытуемый бетон.
5 – скалывающий крюк, 6 – упорный крюк, 7 – скалываемый бетон

Сила отрыва создается либо гидравлическим, либо винтовым домкратом. Перечень приборов, реализующих данный метод, вклю-

часть в себя: «ОНИКС-ОС» (НПП «Интерприбор» г. Челябинск); ГПНС-4, ГПНС-5 (ПромстройНИИпроект, г. Донецк; группа приборов ПОС-30МГ4, ПОС-50МГ4 «Скол», ПОС-2МГ4П (СКТБ «Стройприбор» г. Челябинск).

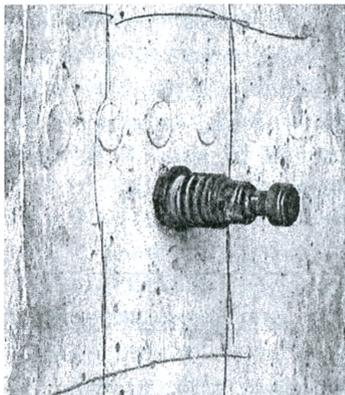


Рисунок 7.4 – Установленный анкер



Рисунок 7.5 – Лунка в бетоне после отрыва анкера

Приборы семейства ПОС (рис. 7.6) и последние разработки – «ОНИКС-ОС» характерны наличием микроконтроллерного блока обработки и индикации результатов измерения силы вырыва анкера.

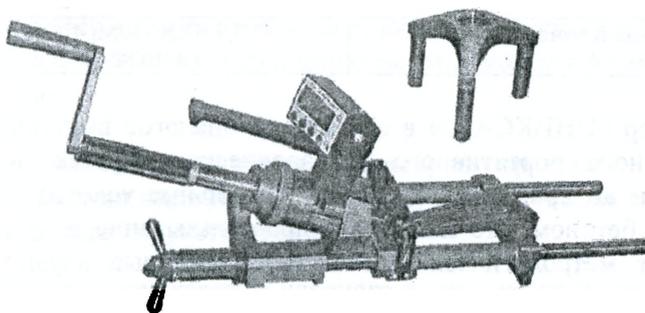


Рисунок 7.6 – Прибор ПОС-30МГ4 "Скол" в сборе для испытаний методом скола ребра

Прибор ПОС-30/50МГ4 "Скол" предназначен для неразрушающего контроля прочности бетона методами скалывания ребра, отрыва со скалыванием и отрыва стальных дисков по ГОСТ 22690. Приборы комплектуются сменными насадками, обеспечивающими испытание бетона, как методом скалывания ребра, так и методом отрыва со скалыванием. С целью повышения точности и производительности испытаний в приборе, в зависимости от метода испытаний, предусмотрена возможность ввода следующих корректирующих параметров, учитывающих вид бетона, условия его твердения, крупность заполнителя, типоразмер анкера. В таблице 7.1 приведены основные характеристики прибора.

Таблица 7.1 – Характеристики приборов ПОС

Наименование характеристик	Скалывание ребра	Отрыв со скалыванием
Диапазон измерения прочности $f_{c,cube}$, МПа	10–70	5–100
Максимальное усилие скалывания (вырыва), кН	29,4 (ПОС-30МГ4"Скол") 49,0 (ПОС-50МГ4"Скол")	
Основная относительная погрешность измерения силы, не более, %	± 2	
Размер анкера (тип II по ГОСТ 22690), мм	–	Ø16x35 (ПОС-30МГ4"Скол") Ø16x35, Ø24x48 (ПОС-50МГ4"Скол")
Питание прибора	батарея типа "Корунд" (6F22, 6LR61) 8 вольт	
Масса в полной комплектации не более, кг	7,9 (ПОС-30МГ4"Скол") 9,8 (ПОС-50МГ4	

Прибор «ОНИКС-ОС» в отличие от аналогов выполнен в виде облегченного портативного гидравлического пресса. Кольцевое крепление анкера в шпуре создает стабильные условия сцепления анкера с бетоном, что исключает проскальзывание и существенно улучшает метрологические и эксплуатационные характеристики прибора.

Все приборы этого метода применяется в ответственных случаях при обследовании железобетонных конструкций и сооружений, а также для корректировки калибровочных коэффициентов ударно-импульсных и ультразвуковых приборов.

Методы пластической деформации

Основа методов – зависимость размера отпечатка, возникающего на поверхности испытуемого изделия при воздействии штампа, обычно сферической формы, от твердости материала.

Как правило, метод реализуется приборами 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. Оценка прочности бетона осуществляется по градуировочной зависимости « $f_c - d_c/d_r$ », где d_c и d_r – диаметры отпечатков шарика-индентора на поверхности бетона и эталонном стальном стержне. Метод применяют для оценки прочности тяжелых бетонов с $f_{c,cube}$ 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 этой группы методов является то, что измерению подвергается лишь твердость растворной части бетона и не учитывается вид, гранулометрический состав крупного заполнителя, его сцепление с растворной составляющей бетона. Наибольшую точность обеспечивает дисковый прибор ДПГ-4(5), так как линейные размеры отпечатка от диска 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 Кашкарова – от 11 до 5 мм.

Методы на основе измерения параметров упругого взаимодействия индентора с бетоном; механическая модель метода упругого отскока

Полная физическая картина ударного взаимодействия индентора с поверхностью бетона весьма сложна и к настоящему времени не формализована исчерпывающим образом. При достаточной энергии удара индентора со сферической поверхностью торца о бетон (рис. 7.7) наблюдаются упругие и пластические деформации. Рас-

Процесс медленного (квазистатического) упругого деформирования в зоне контакта описывается уравнением Герца

$$F_v = \frac{4 \cdot a^3}{3 \cdot R} \frac{(1 - \nu^2)}{E}, \quad (7.3)$$

где F_v – сила упругого взаимодействия индентора с контролируемым материалом; a – радиус области соприкосновения; E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона материала.

В начальной стадии ударного индентирования (рис. 7.7,б) проявляют себя упругие деформации. Так как радиус области соприкосновения для упругих и пластических деформаций один и тот же, то сила упругости меньше пластической силы, поэтому разрушения материала не происходит. При $S = S_0$ наступает момент равенства упругой и пластической сил, и при дальнейшем увеличении внешней силы идет процесс разрушения материала, а сила реакции оказывается равной силе, при которой происходит разрушение материала. Если в какой-то момент прекратить нагружение и уменьшить внешнюю силу, то вследствие возникших пластических деформаций обратный процесс идет по линии ВС. Для критического значения радиуса области соприкосновения a_0 , при котором наблюдается равенство $F_v = F_p$, из выражения (3) следует

$$a_0 = \frac{3\pi\sigma_d R(1 - \nu^2)}{4E}. \quad (7.4)$$

Из выражения (7.4) следует, что a_0 всегда постоянно для заданного радиуса сферы индентора и упруго-прочностных характеристик исследуемого материала.

При динамическом (ударном) индентировании деформация контактной области бетона происходит за счет кинетической энергии бойка. Если не учитывать внутреннее трение в материале, то при малой кинетической энергии W_0 , при которой $a < a_0$, скорость индентора после отскока будет равна скорости до удара. Если кинетическая энергия индентора W_0 достаточна для преодоления границы пластической деформаций x_0 , то часть энергии поглотится бетоном, а энергия затраченная на упругое деформирование W' будет возвращена бойку. За счет энергии упругого деформирования бок, преодолевая упругость пружины, поднимется на высоту h .

При абсолютно неупругом ударе весь процесс закончился бы в точке *B* (рис. 7.7,б). Но при упругопластическом взаимодействии процесс развития удара будет продолжаться и закончится в точке *C*. Для коэффициента восстановления скорости бойка *K*, выраженного через отношение энергии упругих деформаций к полной кинетической энергии движения индентора, можно записать:

$$K^2 = \frac{W'}{W_0} = \frac{V'^2}{V_0^2} = \frac{\pi^{5/4} \cdot 4^{3/4} \cdot 3^{9/4} \cdot \sigma_d^{5/4} \cdot R^{3/4}}{10 \cdot W_0^{1/4} \cdot E^*}, \quad (7.5)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{E_c^*} + \frac{1}{E_{ind}^*} = \frac{1 - v_c^2}{E_c} + \frac{1}{E_{ind}^*},$$

где *W'* – кинетическая энергия индентора после взаимодействия с бетоном.

Как видно из формулы (7.5), при увеличении энергии удара коэффициент восстановления скорости уменьшается, а при увеличении прочности материала и радиуса сферы индентора *K* увеличивается.

Приборы метода упругого отскока

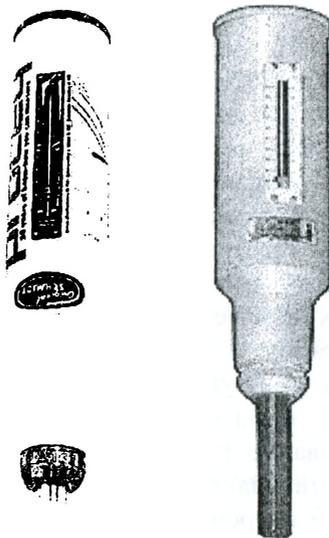
Метод упругого отскока продолжает свое развитие, и к настоящему времени заметно потеснил в производственной практике метод пластической деформации. Перечень приборов реализующих различные вариации этого метода достаточно широк и продолжает пополняться. Первое место по распространенности в строительных организациях Республики Беларусь принадлежит хорошо зарекомендовавшему себя молотку Шмидта: приборы ОМШ-1 (см рис. 7.8), С181, «Proceq», ИП-38, «Schmidt-Hammer» и др.

По зарубежной классификации в зависимости от энергии удара индентора молотки Шмидта делятся на типы, в частности:

М – 29,5 Дж – для испытания бетона фундаментов, мостов, покрытия дорог и других массивных конструкций;

Н – 2,25 Дж – для испытания тяжелых бетонов монолитных и конструкций заводского изготовления (наиболее распространенный);

а



б

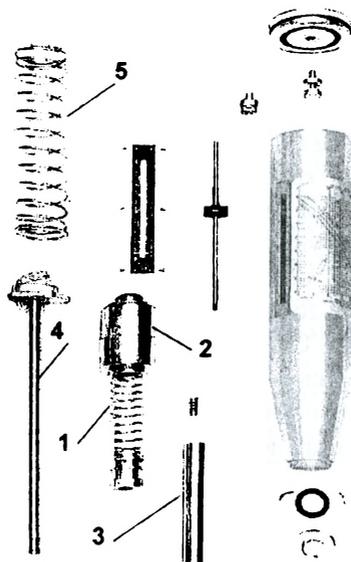


Рисунок 7.8: а — склерометры (молотки) Шмидта «Proseq» и ОМШ-1;

б — элементы конструкции молотка Шмидта;

1 — рабочая пружина; 2 — боек; 3 — индентор; 4 — направляющая бойка со спусковым механизмом; 5 — вспомогательная возвратная пружина

Р – 0,9 Дж – молоток маятникового типа для испытания бетонов и материалов малой твердости и прочности, например газобетон, с прочностью от 5 до 20 МПа;

Л – 0,735 Дж – для испытания легких бетонов и растворов.

Последнее время на рынке приборных средств появились т.н. импортные электронные склерометры импортного производства. В них механический склерометр дополняется электронным блоком обработки результатов измерения. Это заметно повышает оперативность контроля, позволяя вводить в используемый алгоритм обработки данных измерения поправки, учитывающих вид бетона, рабочую ориентацию склерометра, а также данные параллельно выполненных испытаний ультразвуковым методом.

Стандартный метод упругого отскока (ГОСТ 22690-88) предполагает использование так называемых градуировочных зависимостей $f_c = F(h)$, устанавливающих соответствие между индексом (высотой) отскока h и прочностью бетонного образца-куба на сжатие по ГОСТ 10180-90. Несмотря на кажущуюся идентичность конструкций одного наименования молотков Шмидта, при градуировочных испытаниях наблюдаются заметные расхождения полученных градуировочных зависимостей. Поэтому общей рекомендацией при использовании приборов данного метода является их предварительная индивидуальная градуировка. Прилагаемый изготовителем к паспорту прибора градуировочный график следует рассматривать лишь как ориентировочный.

В качестве градуировочных зависимостей (табл. 7.2) для указанных в таблице 7.3 составов бетона возрастом 1–35 суток вполне приемлемо использовать линейные уравнения вида $f_{c,cube} = a + b \cdot h$, рекомендованные ГОСТ 22690. В качестве параметра, оценивающего степень приближения использованной градуировочной зависимости к «истинным» оценкам прочности по результатам прессовых испытаний результатов определения прочности, используется остаточное среднеквадратичное отклонение S_T , рассчитываемое по формуле

$$S_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_{c,i}^* - f_{c,i})^2}{N-1}}, \quad (7.6)$$

где $f_{c,i}$ – прочность бетона в i -той серии образцов, определенная по градуировочной зависимости; $f_{c,i}^*$ – единичные значения прочности для i -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 снижения остаточного средне-квадратичного отклонения до значения $S_{T\ min}$, давало использование нелинейных зависимостей (экспоненциальных и полиномиальных) приведенных в таблице 7.2. Зависимость $f_{c,\ cube} = -23,49 + 2,03 \cdot h$, 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 $r = 0,97$.

Влияние рабочей ориентации склерометра на результаты измерений

При построении и использовании градуировочных зависимостей для склерометров необходимо учитывать систематическую ошибку измерения, возникающую вследствие смены направления рабочей ориентации прибора.² При отскоке индентора от поверхности бетона кинетическая энергия расходуется на совершение работы для сжатия тарированной пружины прибора (см. рис. 7.7,а). Если ось прибора не горизонтальна, то проявляется влияние силы тяжести P , т.к. 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 высоту 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.

Для склерометра Шмидта коррекция выполняется введением поправки h_{II} к значению косвенного параметра h – индексу отскоку индентора:

$$f_c^* = f_c(h + h_{II}), \quad (7.7)$$

² В некоторых новых моделях склерометров Шмидта необходимая поправка вводится автоматически

Таблица 7.2-- Параметры градуировочных зависимостей склерометра ОМШ-1

№ состава	Линейная градуировочная зависимость						Нелинейная градуировочная зависимость						
	Коэффициенты		$S_T/f_{cm}, \%$	r	$S^*/f_c, \%$	r^*	$S_T/f_{cm, min}, \%$	r	Градуировочная зависимость для $S_{T, min}$				
	a	b								A	B	C	
№1	-16,95	1,814	7,35	0,987	9,14	0,987	6,8	0,99	$f_{c, cube} = A \cdot \exp(B/h)$	156,6	-42,0	-	
№3	-35,92	2,453	3,8	0,997	10,7	0,997	2,5	0,998	$f_{c, cube} = A \cdot B^d \cdot h^C$	$1,42 \times 10^{-7}$	0,847	7,17	
№2	-21,74	1,876	8,9	0,97	13,0	0,97	8,0	0,975	$f_{c, cube} = A \cdot \exp(B/h)$	183,7	-49,88	-	
№4	-23,34	2,0636	9,8	0,97	10,4	0,97	9,5	0,97	$f_{c, cube} = A \cdot \exp(B/h)$	187,2	-47,2	-	

h – показания склерометра (индекс отскока); a, b, A, B, C, D – коэффициенты аппроксимирующих функций;
 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» линейной градуировочной зависимости
 $f_{c, cube} = -23,49 + 2,03 \cdot h$

где f_c^* – скорректированное значение прочности бетона, определенной по градуировочной зависимости.

На рис. 7.9 приведены графики расчетных зависимостей поправок индекса отскока для двух направлений удара: с учетом сил трения бойка и без учета сил трения.

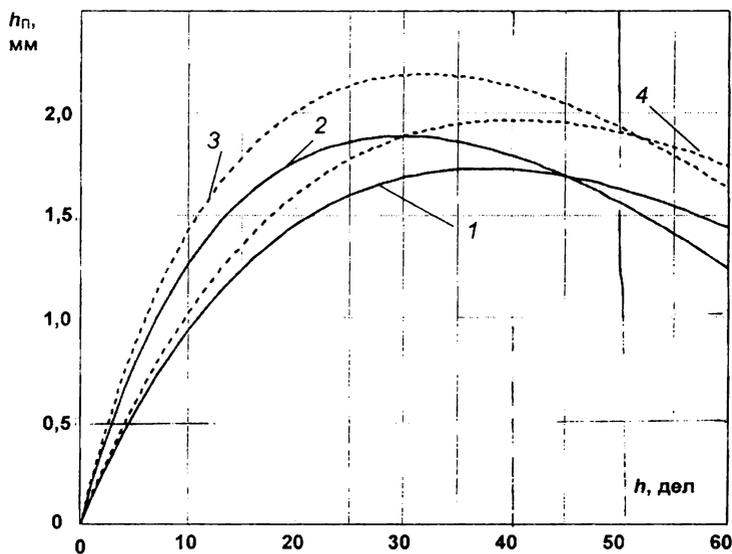


Рисунок 7.9 – Зависимости поправок от величины отскока:

- 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;
- (поправки для удара снизу вверх взяты с обратным знаком)

На практике, для корректировки показаний и проверки стабильности градуировочной кривой рекомендуется использовать металлические образцы-наковальни со значениями массы от 2—3 кг для создания отскока в пределах 10—20 ед. и до 6—10 кг – для верхних границ шкалы отскока.

Метод ударного импульса

Использование для измерения прочности бетона других характеристик, описывающих динамику процесса его ударного взаимодей-

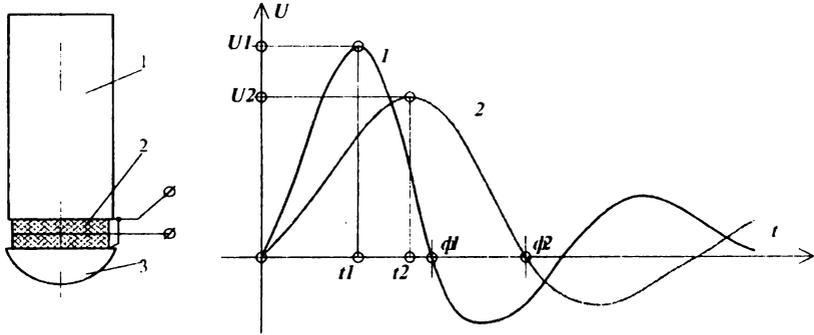
ствия с индентором, например, частотно-временных, может обеспечить определенный эффект. Временные параметры взаимодействия выгодны с позиций аппаратной реализации метода, так как временной интервал может быть измерен с точностью значительно большей, чем высота отскока или диаметр отпечатка. На практике это направление механических методов получило развитие в разработке ударно-импульсного метода. 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:

$$f_c = k \cdot dF/dt, \tag{7.8}$$

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

Приборы такого типа производят оценку прочности бетона по временным характеристикам процесса отскока, в частности, по времени и силе взаимодействия ударника с поверхностью. Заявляемый диапазон измерения прочности бетона составляет для приборов такого типа 10–100 МПа, погрешность – 12 %.

Конструкция индентора таких приборов содержит в себе акселерометр (рис. 7.10,а), генерирующий электрический сигнал (рис. 7.10,б) содержащий информацию о динамике взаимодействия индентора с контролируемой поверхностью.



а – боек; 2 – пьезоэлемент; 3 – твердосплавный наконечник
 Рисунок 7.10 – Сенсорный элемент прибора метода ударного импульса:
 а – акселерометр; б – диаграмма сигнала датчика

Амплитуда сигнала U соответствует максимальной силе взаимодействия, а длительность сигнала τ – времени взаимодействия. Большшему значению прочности и твердости испытуемого материала соответствуют (кривая 1) меньшая длительность сигнала - τ_1 и большая амплитуда - U_1 . Обычно в качестве чувствительного преобразующего элемента используется вставка в индентор из пьезокерамики.

В перечень современных приборов реализующих метод ударного импульса входят: «ОНИКС-2.2/2.3/2.4» , ИПС-МГ4-01/03, «Beton Pro», «Beton Easy».

«ОНИКС-2.2/2.3» (рис. 7.11) предназначен для оперативного определения прочности бетона на сжатие неразрушающим ударно-импульсным методом в соответствии с ГОСТ-22690 и ГОСТ-18105 при технологическом контроле качества изделий, обследовании зданий, сооружений и конструкций.



Рисунок 7.11 – Прибор «ОНИКС – 2.2»

Он применим для определения прочности, твердости и пластичности различных материалов (кирпич, штукатурка, композиты и т.п.), плотности дорожных покрытий. Имеет настройку по видам материалов с возможностью индивидуальной калибровки пользователем. Прибор обеспечивает обработку серии измерений с фиксацией даты и времени их выполнения, коэффициента вариации и размаха, вида материала, учитывает возраст бетона и температуру.

Электронный измеритель прочности бетона ИПС - МГ4.01 (рис. 7.12,а) имеет схожие характеристики.

Несомненным достоинством приборов этого метода является меньшая, по сравнению с ультразвуковыми, подверженность результатов замеров прочности влиянием технологических факторов бетона: - колебаниям влагосодержания, состава заполнителя, возраста. Это позволяет рекомендовать их для технологического контроля набора прочности бетоном в условиях монолитного строительства. Как недостаток приборов измерения прочности бетона ударным методом можно отметить большое влияние на результат измерения неровностей наружного слоя бетона и присутствующих в зоне воздействия индентора локальных неоднородностей бетона (зерен крупного заполнителя). Недостатком также является невысокую «проникающую» способность, - как следствие малой энергии удара и малой «вовлеченной» массы бетона, ограниченная на уровне поверхностного слоя бетона 10...15 мм.

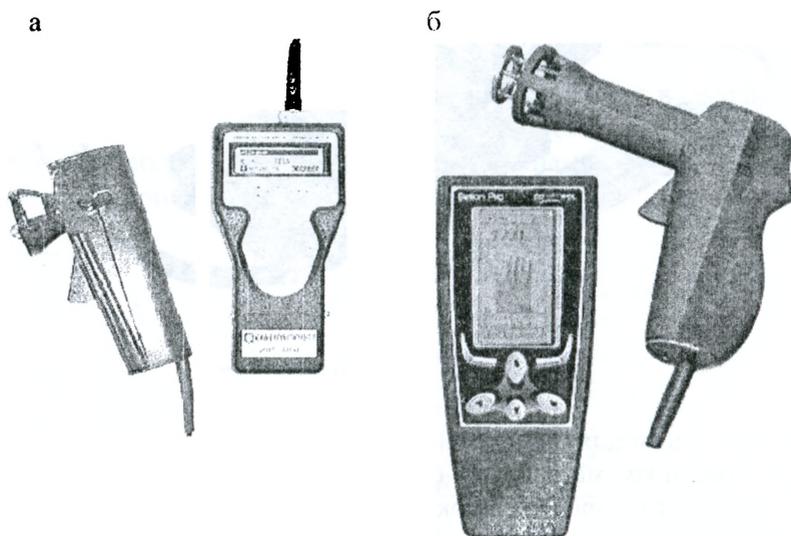


Рисунок 7.12:
а - прибор ИПС - МГ4.01; б - прибор «Beton Pro»

Указанные факторы приводят к значительному разбросу отдельных замеров; их среднеквадратичное отклонение достигает 30---35 % от среднего, а в отдельных случаях и более. Снизить неопределенность измерений удастся при накоплении и статистической обработке достаточно большого массива результатов. Измерительный алгоритм прибора ИПС-МГ4 предусматривает усреднение 10---15 отсчетов и их фильтрацию (отбрасывание отдельных выделяющихся отсчетов).

Как и для склерометров Шмидта, так и для приборов метода ударного импульса требуется индивидуальная коррекция градуировочных зависимостей, которая выполняется поправочными функциями:

$$f_c^* = F_{\Pi}(f_c^{BAS}), \quad (7.9)$$

где f_c^* — скорректированная оценка прочности; f_c^{BAS} — оценка по базовой зависимости; F_{Π} — поправочная функция.

Подбор поправочных функций производится аналогично построению градуировочных зависимостей для склерометров Шмидта.

Для сравнения двух методов контроля, на рис. 7.13 сопоставлены экспериментальные данные оценок прочности бетонных образцов четырех составов (см. табл. 7.3) по результатам прессовых испытаний и выполненных параллельно измерений методами упругого отскока (ОМШ-1) и ударного импульса (ИПС-4МГ).

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.

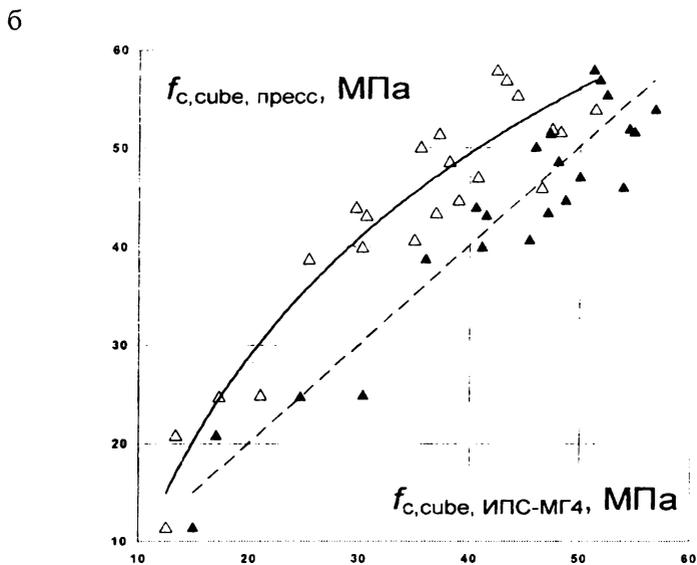
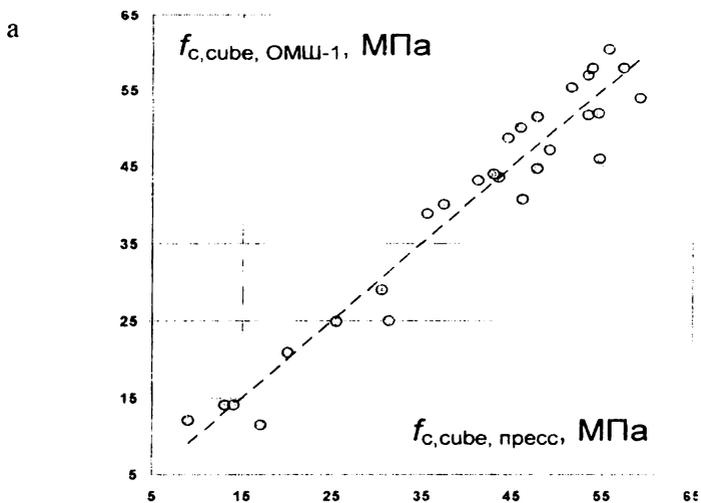


Рисунок 7.13:

а — соответствие оценок прочности бетонных образцов методом упругого отскока ($f_{c,cube} = -23,49 + 2,03 \cdot h$); б — методом ударного импульса (Δ — оценки прочности по базовой градуировке; ▲ — оценки прочности после коррекции градуировки)

Таблица 7.3– Составы бетона

Наименование состава	Обозначение состава	Марка по удобоукла- дываемости	Расход песка		Расход щебня		Расход цемента, ПЦ-500	Расход пластификатора л (кг)	
			кг	м ³	кг	м ³		кг	Стахе- мент
			Состав №1 *	C25/30 F100 W6	П3	750	0,5		1100
Состав №2 **	C35/45 F100	П4	710	0,47	1000	0,71	600	4,8 (4,1)	
Состав №3 **	C30/37	П4	730	0,49	1050	0,75	540		5,4 (6,4)
Состав №4 **	C35/45 F100	П4	700	0,47	1030	0,74	600		6,0 (7,1)

*Расход воды при осадке конуса 13—15 см .

**Расход воды при осадке конуса 16—18 см (марка по удобоукладываемости П4) .

Приборы склерометрических методов (методов индентирования) являются измерителями параметров ударного взаимодействия с поверхностью бетонного изделия твердосплавного индентора. Измеряемый косвенный параметр является отображением комплекса физико-механических характеристик, включая прочность бетона и характеристик его упругости. Степень превалирования тех или иных характеристик бетона в полученном значении косвенного параметра зависит как от свойств бетона - его технологии изготовления, так и от характеристик самого измерительного прибора: энергии удара, массы индентора и др. Физико-механические характеристики, их соотношения различны для бетонов разных составов и технологий, в силу чего и оценки прочности бетона, полученные ударными методами приобретают некоторую неопределенность. В принципе, методы индентирования позволяют отдельно определять упругие и пластические (прочностные) параметры контролируемой среды, например, получить зависимость $\sigma = F(\epsilon)$. Главным же недостатком этой группы методов, применительно к бетону, является «точечность» воздействия, а значит и оценки его свойств.

7.2. Акустические и электромагнитные методы контроля бетона

Метод акустической эмиссии

В пассивных акустических методах, к которым относится метод акустической эмиссии (АЭ), для оценки состояния бетона используют параметры механических колебаний, генерируемых самим испытываемым материалом.

Сущность метода состоит в регистрации с последующей обработкой и интерпретацией параметров акустических волн, вызванных внутренней динамической локальной перестройкой структуры бетона при его твердении, силовых и иных воздействиях.

Основные причины АЭ – процессы пластической деформации, связанные с появлением, движением и исчезновением дефектов кристаллической решетки: возникновение и развитие микро- и макротрещин; трение; фазовые превращения в твердом теле.

Характер акустического сигнала шумоподобный, – он представляет собой последовательность импульсов (рис. 7.14), малой

длительности, с нерегулярными амплитудой и периодом следования.

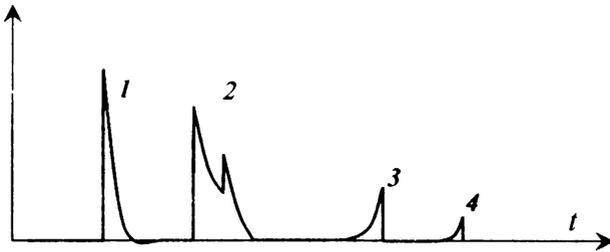


Рисунок 7.14 – Характерные формы импульсов акустической эмиссии:
1 и 2 – релаксационные импульсы; 3 и 4 – импульсы акселерационного типа

Энергия импульсов АЭ составляет от 10^{-18} – 10^{-16} Дж – для аннигиляционных процессов, до 10^{-6} Дж для релаксационных. Спектр частот импульсов АЭ достаточно широкий и простирается до нескольких мегагерц, но сильное ослабление высокочастотных составляющих в бетоне приводит к искажению формы акустического сигнала, достигающего приемника. В результате, частотный спектр такого «профильтрованного» бетоном сигнала сужается до нескольких сотен килогерц.

Основные параметры АЭ – число зарегистрированных импульсов за время наблюдения N_z и активность - dN_z/dt , равная количеству импульсов за единицу времени. Параметром, учитывающим еще и амплитуду импульсов, является эффективное значение АЭ, оцениваемое произведением активности АЭ на среднее значение амплитуды сигнала за единицу времени.

Метод позволяет выявлять в бетонных конструкциях скрытые дефекты на стадии их зарождения, а также контролировать нарастание прочности бетона в процессе его твердения, в том числе и на ранних стадиях, с целью прогнозирования прочности в проектном возрасте. Обычно акустико-эмиссионные испытания проводятся в условиях растущей нагрузки. Начальное приложение нагрузки приводит, как правило, к возникновению большей эмиссии, чем последующее повторное нагружение (эффект Кайзера).

Использование метода АЭ для оценки прочности монолитного бетона наталкивается на ряд трудностей, к которым относится, в первую очередь, необходимость создания достаточно больших,

нормированных испытательных нагрузок, а также армирование, приводящее к перераспределению напряжений в бетоне конструкции при её нагружении и, как следствие, значительному усложнению картины локализации зон генерации сигналов АЭ.

Важным достоинством метода АЭ является возможность обнаружения развивающихся, т.е. наиболее опасных дефектов конструкции. Но, несмотря на большие потенциальные возможности метода АЭ применительно к бетону, к настоящему времени он не регламентирован нормативами.

Активные акустические методы контроля прочностных параметров бетона

Перечень активных акустических методов достаточно широкий. К наиболее распространённым в практике неразрушающего контроля можно отнести следующие: прохождения, отражения, комбинированные, собственных частот (спектральные), - включающие в себя метод свободных колебаний (резонансный), и импедансные. Имеется немало методов, которые могут быть одновременно отнесены к различным классификационным группам, в частности, рассмотренный ниже так называемый Impact Echo метод (ИЕМ), может быть отнесен и к группе методов свободных колебаний, и к группе методов прохождения и отражения.

Все активные акустические методы неразрушающего контроля бетона используют параметры процесса волнообразования и волнового распространения в испытуемой конструкции (или образце) для оценки упругодеформативных и прочностных свойств бетона. Источник акустических колебаний является составной частью самого измерительного прибора.

Ультразвуковой импульсный метод определения прочности бетона

Суть метода (ГОСТ 17624–87) заключается в регистрации времени (скорости) прохождения волны от возбуждающего её излучателя к приемному преобразователю, с последующим пересчетом полученной характеристики в значение прочности бетона по установленной ранее градуировочной зависимости. Надо заметить, что с

позиций акустики и теории упругости скорость распространения упругих волн определяется не прочностью испытуемого материала, а его динамическими модулями упругости в соответствии с формулами

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}; \quad (7.10)$$

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \approx 0,55 \cdot c_l, \quad (7.11)$$

где E_d – динамический модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала; c_l , c_t – скорости продольной и поперечной упругих волн.

Но поскольку между прочностью зрелого бетона и его модулем Юнга существует корреляция, выражаемая зависимостью

$$E_{cm} = 9.5(f_{ck} + 8)^{1/3} \cdot 10^3, \text{ МПа}, \quad (7.12)$$

то этим можно объяснить и корреляцию скорости упругой волны в бетоне и его прочности на сжатие. Но следует всегда помнить, что упругие и прочностные свойства бетона в разной степени зависят от возраста бетона, его состава, уплотнения, влажности. Поэтому данный метод, как уже указывалось выше, является выражено *технологозависимым*.

Основным способом контроля по ГОСТ 17624 является сквозное прозвучивание (рис. 7.15,а).

Излучатель и приемник ультразвуковых колебаний (УЗК) располагают соосно по разные стороны контролируемого изделия. Скорость ультразвукового импульса определяется:

$$c_i = \frac{l}{t_i}. \quad (7.13)$$

Аналогично определяется скорость импульса при поверхностном прозвучивании (рис. 7.15,б).

Для способа продольного профилирования приемный преобразователь устанавливается последовательно в несколько позиций, расположенных на одной линии. Расстояние l_0 между излучающим и первой позицией приемного преобразователя выбирают равным

100–300 мм, а между соседними позициями приемного преобразователя $\Delta l_i = 100\text{--}150$ мм.

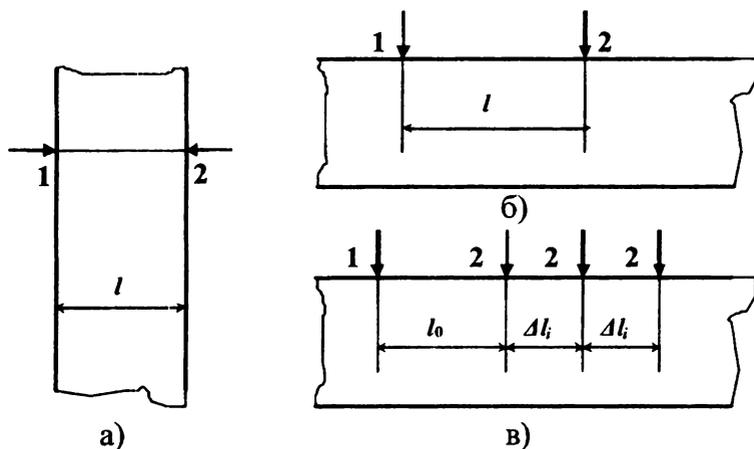


Рисунок 7.15 – Основные способы испытаний бетона при оценке скорости прохождения у.з. колебаний:
 а – сквозное прозвучивание; б – поверхностное прозвучивание на постоянной базе (по ГОСТ 17624); в – продольное профилирование;
 1 – зона установки излучателя; 2 – зона установки приемника

Средняя скорость прохождения волны колебаний определяют по формуле:

$$c_{cp} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\Delta l_i}{\Delta t_i}, \quad (7.14)$$

где $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ – изменение времени распространения у.з. при перемещении приемного преобразователя на соседнюю позицию;

N – число позиций установки приемного преобразователя.

В таблице 7.4 приведены примеры градуировочных зависимостей в виде степенных функций.

Остаточное среднее квадратическое отклонение S_T для приведенных зависимостей находилось в пределах 2–3,6 МПа. Такое же значение S_T обеспечивалось и экспоненциальными зависимостями вида: $f_{c, cube} = A \cdot e^{Bt}$.

Таблица 7.4 – Градуировочные зависимости для оценки прочности бетона в возрасте 14 суток (прибор УК1401)

№ состава бетона (таб. 7.3)	Градуировочная зависимость
1	$f_{c,cube} = 2,74 \cdot 10^6 \cdot t^{-3,219}$
2	$f_{c,cube} = 6,5 \cdot 10^5 \cdot t^{-2,784}$
3	$f_{c,cube} = 2,01 \cdot 10^9 \cdot t^{-5,009};$
4	$f_{c,cube} = 1,17 \cdot 10^6 \cdot t^{-2,909};$

t – время распространения УЗК при поверхностном прозвучивании на базе 150 мм. $f_{c,cube}$ – прочность (куб.) на сжатие, МПа.

Поверхностное прозвучивание и профилирование (рис. 7.15,б, в) представляют для практики контроля бетона в построечных условиях особый интерес, что обусловлено ограниченными возможностями доступа к изделию находящемуся в опалубке, и значительными габаритами монолитных конструкций, затрудняющими соосную установку преобразователей на противоположные грани изделия и определение базы прозвучивания с необходимой точностью. Но картина акустического поля в точке приема при поверхностном прозвучивании выглядит значительно сложнее, чем для объемных волн сквозного прозвучивания. Скорость распространения импульса упругой волны в зоне, близкой к грани образца, может заметно отличаться от скорости объемной волны, что требует более сложных методик для правильной интерпретации полученных результатов.

Приведенные выше зависимости (7.10) и (7.11) позволяют достаточно точно определить упругие модули бетона. Но следует заметить, что нормативы, в частности ГОСТ 17624, не регламентируют измерение скорости поперечных волн в бетоне. Основной причиной является отсутствие аппаратной поддержки, поскольку все без исключения ультразвуковые приборы, представленные на рынке приборных средств контроля бетона, являются фактически измерителями скорости продольных волн.

Особенностью бетона, как поликристаллического композиционного материала является выраженная зависимость скорости упругих волн от действующего в нем напряжения. На рис. 7.16 приведены некоторые характерные кривые по данным совместных прессовых и

ультразвуковых испытаний бетонных образцов-призм 100x100x200 мм.

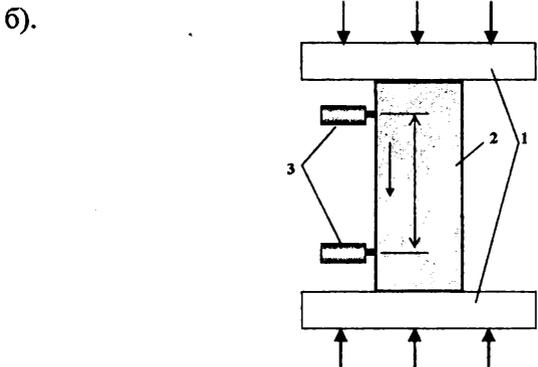
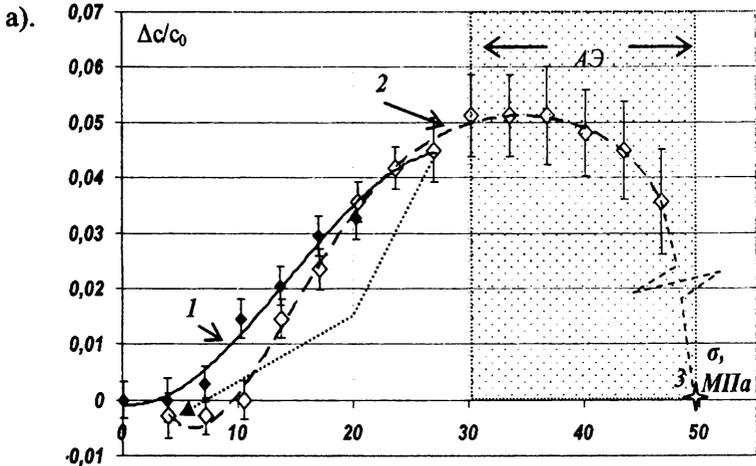


Рисунок 7.16 – Зависимость скорости продольных ультразвуковых волн от напряжения:

a – кривая 1 для первого нагружения образца-призмы; кривая 2 для повторного нагружения; 3 – разрушающая нагрузка (состав бетона № 2 табл. 7.3); возраст бетона 370 сут.; *б* – схема испытаний образца-призмы: 1 – плиты пресса, 2 – испытуемый образец-призма; 3 – излучающий и приемный УЗ преобразователи

Нагружение образцов производилось в осевом направлении прессом, скорость приложения нагрузки – 1 МПа/с, скорость УЗК измерялась на одной из боковых гранией. На диаграммах можно

выделить три характерных стадии: стадия уплотнения бетона ($0 < \sigma < 0,5 - 0,6\sigma_p$); стадия микроразрушений ($0,5 - 0,6\sigma_p < \sigma < 0,8 - 0,95\sigma_p$); и стадия макроразрушения, - образования магистральных трещин и разрушения образца ($0,8 - 0,95\sigma_p < \sigma \leq \sigma_p$).

Как видно на рис. 7.16, первой стадии соответствует линейное нарастание скорости УЗК. Происходит уплотнение бетона, «закрытие» микродефектов. Для второй стадии нагружения характерно снижение скорости приращения скорости УЗК, достижение ею пикового значения и постепенное снижение. Этой же стадии присуще нарастание активности акустической эмиссии – область АЭ на диаграмме. Третья стадия характерна объединением микродефектов, образованием макротрещин, их объединением в магистральные трещины. Скорость УЗК на этой стадии резко снижается

Наличие гистерезиса на диаграмме рис. 7.16,а свидетельствует о проявлении пластических свойств бетона, связанных с необратимыми деформациями образца после снижения нагрузки. Максимальное значение гистерезиса для относительного изменения скорости УЗК составило около 20 % от максимального.

Приборы ультразвукового импульсного метода контроля

Повышение информативности ультразвукового контроля намечалось в связи с появлением портативных приборов с сухим точечным акустическим контактом. Используемые в них алгоритмы обработки акустических сигналов и примененные новые виды электроакустических преобразователей позволяют предположить, что в ближайшем будущем в качестве косвенного информационного акустического параметра наравне со скоростью продольных волн будет использоваться скорость поперечных волн и волн Релея.

Приборы нового поколения с развитым набором сервисных функций по накоплению данных замеров и возможностью автоматизации обработки с использованием стыка с компьютера: «Пульсар -1.1/1.2» (рис. 7.17), УК1401 (рис. 7.18). С их помощью осуществляется поверхностное прозвучивание на постоянной базе, с использованием сухого точечного контакта (СТК).

К несомненным достоинствам прибора «Пульсар-1.2» следует отнести предусмотренную разработчиками возможность визуализа-

ции принятого акустического сигнала³, а также возможность сквозного прозвучивания на достаточно больших базах.



Рисунок 7.17 – Ультразвуковой прибор «Пульсар-1.0»: I – электронный блок; II – акустический зонд с СТК



Рисунок 7.18 – УЗ прибор УК1401

³ В приборе УК1401 визуализация реализуется компьютером с помощью программы ActiveLink. Стык прибора с ПК производится через инфракрасный порт

Таблица 7.5 – Характеристики УК1401

1	Диапазон измерений времени, мкс	15 – 100
2	Диапазон измерений скорости ультразвука, м/с	1500 – 9999
3	Дискретность индикации времени, мкс	0,1
4	Рабочая частота ультразвуковых колебаний, кГц	70±10
5	Частота посылок зондирующих импульсов, Гц	20
6	Диапазон рабочих температур, °С	от –20 до +50
7	Масса, г	350
8	Габаритные размеры корпуса, мм	200x120x35

Метрологические параметры приборов УК1401 (см. таб. 7.5) и «Пульсар-1.01/1.2» близки.

Кроме перечисленных, в настоящее время в эксплуатации находится значительное количество других приборов снятых с производства, но имеющих приемлемые для осуществления контрольных функций характеристики. Приборы УФ-90ПЦ, УК-11, УК-12, УК-15, УК-16П, УК-19, обеспечивая метрологические параметры, близкие к указанным выше «Пульсар -1.1/1.2» и УК1401.

В перспективе разработки новых методов весьма обещающим выглядит метод контроля физико-механических свойств бетона на использовании нелинейности его характеристики напряжение - деформация. Физически это означает, что определяющий скорость распространения акустических волн динамический модуль упругости зависит от механического напряжения. Нелинейность упругости бетона должна приводить к расширению частотного спектра акустического сигнала - появлению кратных частот (гармоник) основной частоты зондирующего сигнала. Влияние нелинейности на скорость волны и спектр принятого сигнала незначительное, и для его обнаружения необходимо применять чувствительную аппаратуру. Предполагается, что метод, использующий нелинейные свойства бетона позволит оценивать прочность бетонов высоких марок (М500–М800), что на основе корреляции «скорость УЗК – прочность бетона» по ГОСТ 17624-87 не представляется возможным. Правда, следует добавить, что до настоящего времени метод не вышел из стадии лабораторных исследований, приборы промышленного применения не выпускаются.

Импакт-эхо (Impact Echo) метод

В последние 7–10 лет набирает популярность у исследователей и энергично внедряется в практику неразрушающего контроля бетона в США и многих странах западной Европы так называемый Impact-Echo метод (ИЕМ). Название метода можно перевести как *отклик (эхо) от удара*. Новым этот метод, в его физической основе, можно назвать весьма условно – «выстукивание» предметов с целью определения их целостности и качества использовалось и используется с незапамятных времен.

ИЕМ следует причислить к акустическим методам дефектоскопии. 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. Основными косвенными параметрами метода являются длительность отклика и соотношения основных частотных составляющих спектра колебаний (рис. 7.19). Для визуализации акустического сигнала и его анализа, как правило, используют спектральные методы, а соответствующие компьютерные программы – алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ).

ИЕМ высоко эффективен для обнаружения скрытых под поверхностью дефектов: трещин, расслоений, пустот.

При отсутствии дефекта, после ударного воздействия в зоне контроля образуется акустическое поле, основные составляющие которого имеют частоты, кратные частоте полуволновых колебаний (рис. 7.19,б), которая является опорной f_T и связана со скоростью распространения продольной волны c и расстоянием T соотношением

$$f_T = \frac{c}{2T}. \quad (7.15)$$

Наличие дефекта обогащает частотный спектр составляющими, частота которых определяется глубиной дислокации дефекта d , а амплитуда зависит главным образом от размеров, формы и ориентации по отношению к фронту волны:

$$f_d = \frac{c}{2d}. \quad (7.16)$$

При этом, как показано на рисунке 7.19, *e*, опорная частота может сместиться вниз.

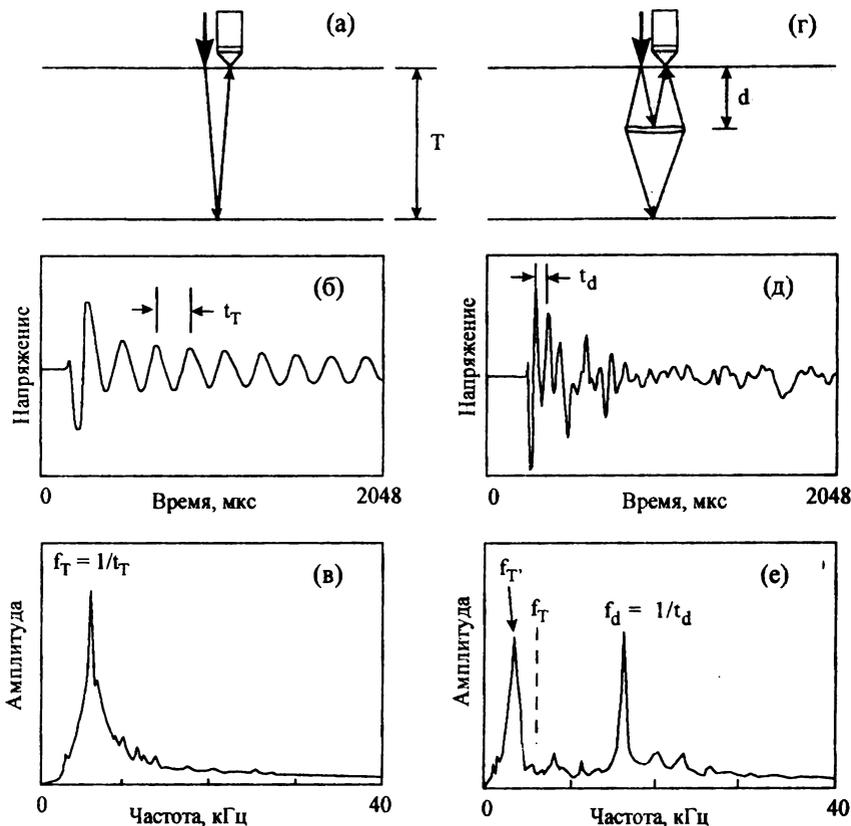


Рисунок 7.19 – Сравнение акустического отклика при отсутствии дефекта в зоне контроля (слева) и при наличии дефекта:

a, z – схемы контроля; *б, д* – временные диаграммы сигналов откликов;
в, e – частотные спектры сигналов

Возбуждение колебаний в бетоне обычно производится специальным ударным механизмом, либо вручную, - нанесением удара стальным шариком (рис. 7.20 и 7.21) по поверхности изделия вблизи приемного преобразователя.

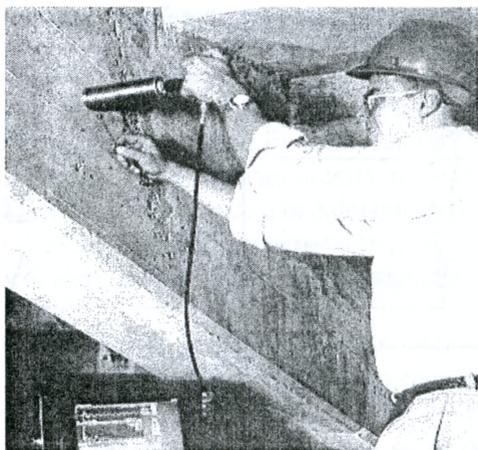


Рисунок 7.20 – Контроль состояния балки Impact-Echo методом

В зависимости от размеров и формы изделия, упругих свойств бетона, присутствия крупных дефектов, а также массы шарика изменяется частотный спектр отклика, меняются временные параметры отдельных его участков. Как правило, частотный спектр отклика находится в пределах от единиц килогерц до 60–80 кГц.

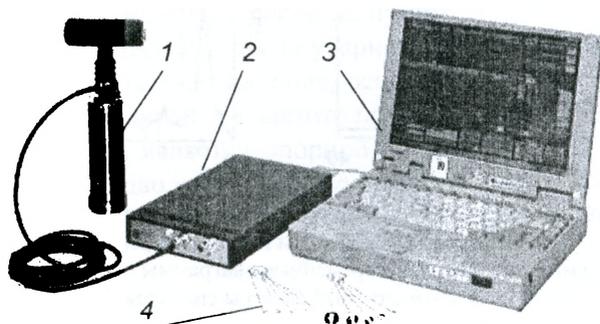


Рисунок 7.21 – Типичный комплект системы для оценки состояния бетонных изделий Impact-Echo методом:

- 1 – приемный акустический сенсор; 2 – блок усиления и оцифровки;
- 3 – PC; 4 – сферические инденторы

Прием колебаний осуществляется пьезоэлектрическими датчиками 1, регистрация и обработка сигнала – посредством портатив-

ного компьютера 3, связанного с датчиком через блок предварительной обработки сигнала 2, производящего его усиление и «оцифровку» (см. рис. 7.21).

Определение прочности (упругости) бетона производится по скорости прохождения импульса, на основе градуировочных зависимостей, аналогичных зависимостям ультразвукового импульсного метода. Скорость распространения упругой волны определяется по формуле (7.15), зная толщину изделия и частоту f_T (рис. 7.19, в).

Основным достоинством импакт эхо метода, в сравнении с ультразвуковым импульсным является возможность прозвучивания крупногабаритных конструкций. Возможности ультразвукового метода ограничены расстоянием прозвучивания 0,5–1 м, что связано с большим затуханием ультразвуковых волн в структурно-неоднородной среде – бетоне. Частота акустических колебаний ИЕМ обычно находится в диапазоне единиц килогерц и определяется толщиной контролируемого изделия: чем толще изделие, тем ниже частота и, соответственно, - затухание. Поэтому с помощью ИЕМ можно давать оценку упруго-прочностных показателей протяженных изделий с габаритами до нескольких метров. В частности, при достаточно «энергичном» ударе возможна оценка целостности и прочности бетонных свай длиной до 20 м.

В оценке прочности и параметров упругости бетона оба метода дают близкие оценки, но ИЕМ «охватывает» больший объем бетонного массива.

ИЕМ успешно конкурирует с рассмотренными ниже методами дефектоскопии бетона, позволяя надежно обнаруживать скрытые под поверхностью дефекты – трещины, зоны недоуплотнения, расслоения бетона.

Имеются данные использования метода для оценки нарастания прочности бетона в процессе тепловой обработки. В качестве информационного параметра рассматривалась динамика перераспределения спектральной плотности акустического сигнала. На рис. 7.22 приведен пример спектрограммы процесса твердения бетона.

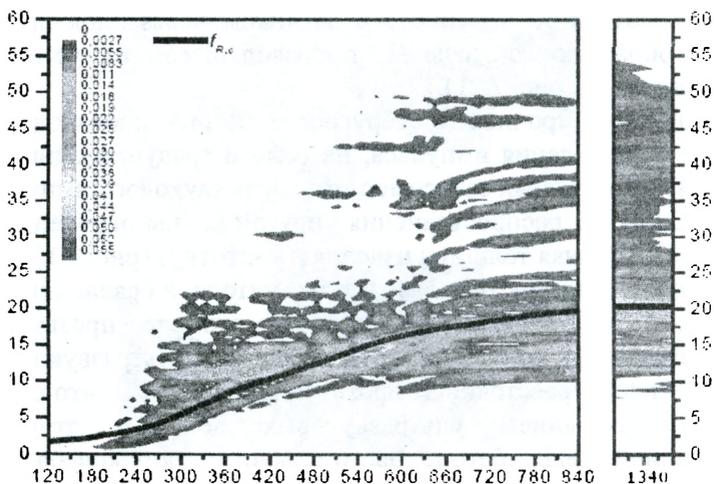


Рисунок 7.22 – Спектрограмма акустического отклика в процессе твердения бетонного образца на горизонтальной оси показаны отсчеты времени твердения образца, мин.; на вертикальной – частота, кГц.

Градации плотности изображения соответствуют амплитуде спектральных составляющих; сплошной черной линией f_{RC} показана кинетическая кривая для основной частоты спектра

По мере созревания бетона наблюдается постепенное обогащение спектра отклика высокочастотными составляющими. Интерпретация такого рода данных контроля (рис. 7.22) 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.

Кроме армирования и дефектов сплошности (пустот, трещин) бетона на частотный спектр акустического отклика большое влияние оказывает форма контролируемого изделия. Выраженные пики частотного спектра (рис. 7.19, *e*) отчетливо наблюдаются в том случае, когда один размер изделия значительно отличается от двух остальных, например, в плитах, стенах, толщина которых много меньше их длины и ширины; в сваях, - длина много больше габаритов сечения. Для такого типа изделий ИЕМ наиболее эффективен и прост в реализации. Если же размеры становятся соизмеримыми, например, толщина и ширина колонны, то частотный спектр отклика значительно усложняется (рис. 7.23, *б*): в нем возникает мно-

жество частотных составляющих, соответствующих различным типам возникающих колебаний, трансформирующихся одни в другие. Анализ такого рода спектра визуально затруднителен, что пока ограничивает область применения ИЕМ.

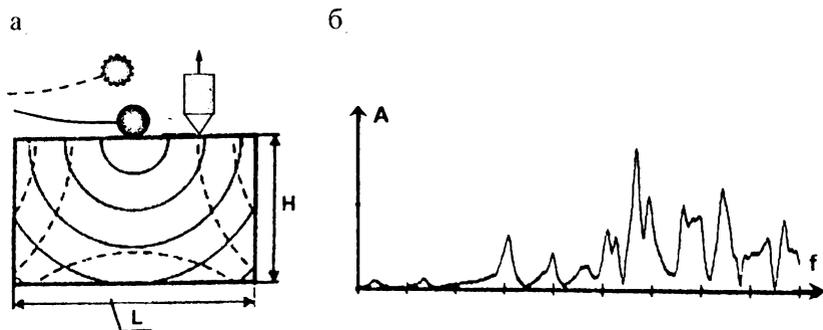


Рисунок 7.23:
 а — переотражающиеся колебания в сечении колонны;
 б — частотный спектр колебаний в точке контроля

Несмотря на то, что разрешающая способность ИЕМ, его возможности пространственной локализации одиночных дефектов и максимальная глубина «зондирования» невелика, но высокая чувствительность к приповерхностным дефектам, а также к скрытым протяженным дефектам структуры бетона, влияющим в наибольшей степени на несущую способность конструкции, открывает этому методу широкую перспективу практического использования.

Резонансный метод

По своей физической основе резонансный метод (РМ) и ИЕМ очень близки. РМ основан на зависимости резонансных частот различных типов колебаний испытываемых образцов бетона, от его параметров упругости. При испытании образцов (или изделий) измеряют собственную частоту и затухание изгибных, крутильных или продольных колебаний. Как правило, принимаются во внимание основные (низшие) частоты колебаний. 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 7.24 приведена схема измерения параметров изгибных колебаний.

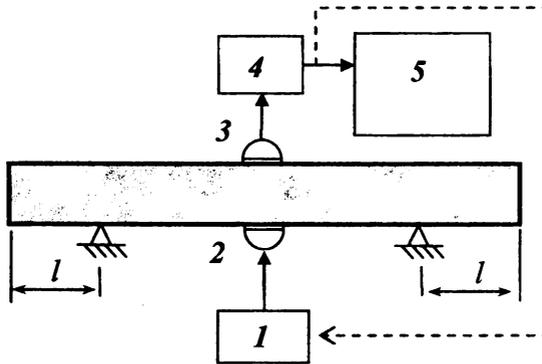


Рисунок 7.24 – Схема измерения частоты резонансных, изгибных колебаний бетонного образца:

- 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_r и собственной частоты f_0 образца. В этом случае, модуль Юнга E может быть определен из соотношения

$$E = 0,0789 \frac{f_0^2 \cdot L^4 \cdot \rho \cdot q}{i^2 \cdot 981}, \quad (7.17)$$

где L – длина образца, см; ρ – плотность, кг/м³; i – радиус инерции в плоскости сечения образца, см; q – коэффициент, зависящий от отношения размера образца в плоскости колебаний к его длине.

Введение обратной связи, показанное на рис. 7.24 штриховой линией, позволяет создать в системе автоколебания на резонансной частоте.

РМ используется для лабораторных испытаний образцов и изделий простой формы: призм, цилиндров, стержней. Применение метода на строительной площадке для контроля монолитных конструкций затруднено рядом причин, главной из которых является сложность анализа колебательной системы, образованной большим числом механически взаимодействующих конструктивных элементов строительного объекта. Армирование конструкций еще больше усложняет 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.

Тем не менее, анализ частотных характеристик групп элементов или всего объекта в целом может в перспективе оказаться эффективным для оценки жесткости конструкций, соответствия их механических характеристик заданным требованиям.

Дефектоскопия бетона

Важное место в неразрушающем контроле бетонных изделий принадлежит дефектоскопии - методам и способам выявления и локализации структурных неоднородностей: пустот, трещин, областей повышенной пористости, расслоения, недоуплотнения и др. Если в области ультразвуковой дефектоскопии однородных, мелкозернистых материалов, металлов накоплен огромный опыт, создан широкий спектр высокоэффективных приборных средств, разработаны и стандартизированы методики контроля, то применительно к бетону этого сказать нельзя. Сложность выявления дефектов в бетоне связана, в основном, с его неоднородностью – наличием крупного заполнителя, размер зерен которого накладывает ограничение на минимальную длину волны зондирующих колебаний. С длиной волны λ , в свою очередь, связан размер выявляемого дефекта, а также степень направленности «луча» зондирующих колебаний. Указанные ограничения не позволяют уменьшить длину волны ниже 4–3 см, что соответствует частотам 70–100 кГц.

Работы в области совершенствования ультразвуковых приборных средств дефектоскопии бетона привели к появлению сравнительно нового класса приборов – низкочастотных ультразвуковых дефектоскопов. Они позволяют производить локализацию и оценку размеров дефектов в крупноструктурных материалах, в том числе и в бетоне при одностороннем доступе к изделию, используя отраженный от дефекта сигнал, обеспечивая визуализацию дефектов на встроенном дисплее. Основой измерительного тракта является акустическая фазированная антенная решетка (ФАР), представляющая собой матрицу низкочастотных, широкополосных ультразвуковых преобразователей с низким уровнем реверберации. Объединение преобразователей в плоскую матрицу (расстояние между отдельными ЭАП составляет $0,5 \rightarrow 1$ длины волны в бетоне) и особый режим их возбуждения позволяют управлять фокусировкой зондирующего ультразвукового «луча». Изменение направления зондирующего «луча», его фокусировка в заданную область пространства контроля осуществляется «электронным» способом. На рис. 7.25 показан низкочастотный акустически дефектоскоп – томограф А1220 использующий эхо-метод. Разрешающая способность прибора составляет приблизительно 60 – 80 мм по обеим осям координат.



Рисунок 7.25 – Низкочастотный дефектоскоп А1220-МОНОЛИТ

Чувствительность его достаточна для обнаружения в мелкозернистом бетоне полостей с размерами от 30 мм и более. При размерах крупного заполнителя более 20–30 мм томограф позволяет об-

наружить полости, превышающие средний размер зерна в 1,5— 2 раза⁴.

Конструктивно дефектоскоп А1220 МОНОЛИТ состоит из электронного блока с экраном и клавиатурой, а также 24-элементного (6x4) матричного антенного устройства (АУ). Элементы АУ подпружинены и дают возможность измерения на криволинейных и шероховатых поверхностях.

Представляет интерес опыт использования для локализации и оценки размеров неоднородностей и структурных нарушений в бетоне методов радиолокации. Выбор длины волны зондирующих электромагнитных волн связан с теми же ограничениями, что и для ультразвука. Но, учитывая, что скорость электромагнитных волн в бетоне лишь в 2— 3 раза ниже скорости света, то используемый частотный диапазон смещается в область 10^9 — 10^{10} Гц, а измеряемые интервалы времени – в область 10^{-9} — 10^{-10} секунды.

Излучаемый в исследуемую среду импульс отражается от неоднородностей, имеющих отличную от среды диэлектрическую проницаемость или проводимость, принимается приемной антенной, усиливается в широкополосном усилителе. После преобразования в цифровую форму, информация поступает на портативный компьютер для дальнейшей обработки и регистрации.

Основными достоинствами метода радиолокации в сравнении с акустическими методами являются: возможность бесконтактного (на расстоянии) взаимодействия приемно-излучающей системы с контролируемым изделием, возможность плавной/ступенчатой перестройки частоты зондирующих колебаний в достаточно широком диапазоне, что повышает информативность контроля. Бесконтактный ввод-прием сигнала упрощает процесс сканирования контролируемой поверхности и позволяет выполнять его с большой скоростью, что особенно важно при обследовании состояния дорожного и аэродромного покрытий.

Известны радиолокационные приборы подповерхностного зондирования (в общепринятой терминологии – георадары) серии «ОКО» и радиолокаторы «Раскан-3». Конструктивно приборный

⁴ В приборе А1220 используются поперечные ультразвуковые волны, что позволяет в сравнении с продольными волнами при одинаковой частоте колебаний получить меньшую длину волны.

комплект включает в себя антенный блок (в комплект может входить несколько антенных блоков разных частотных диапазонов) стыкующийся с компьютером, выполняющим управление зондированием, обработку и 3-D визуализацию результатов санирования. На рис. 7.26 показан антенный блок АБ-400 георадара «ОКО» Частотный диапазон антенного блока определяет разрешающую способность и максимальную глубину зондирования, - более высокой частоте соответствует лучшая разрешающая способность, меньшей частоте соответствует бóльшая (до 30 м) глубина зондирования. На рис. 7.27 приведены радарограмма сканирования участка взлетно-посадочной полосы и её расшифровка.

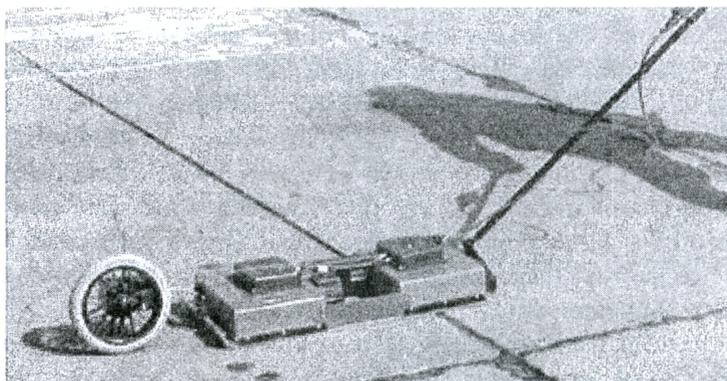


Рисунок 7.26 – Антенный блок АБ-400 георадара «ОКО» при обследовании взлетно-посадочной полосы

Использование георадара «ОКО» для контроля монолитного бетона эффективно для крупноразмерных изделий.

Прибор серии “РАСКАН” (рис. 7.28) позволяет обнаруживать протяженный объект диаметром 0,05 мм и длиной 20 мм в толще бетона на глубине 50 мм, осуществляя формирование изображения исследуемой подповерхностной области на экране монитора компьютера.

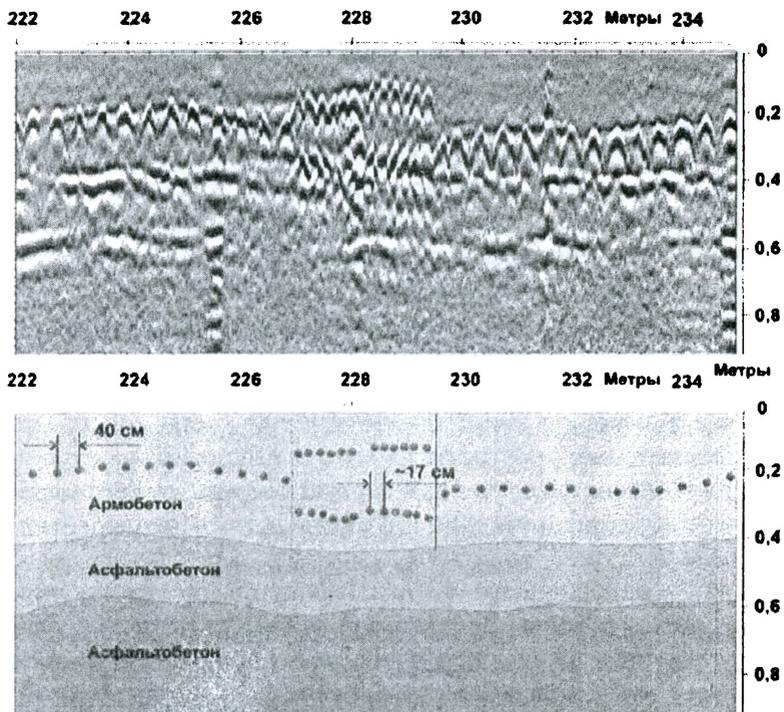


Рисунок 7.27—Радарограмма георадара «ОКО» с антенным блоком АБ-1700 (вверху); расшифровка радарограммы (внизу)

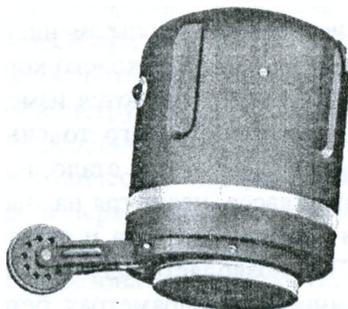


Рисунок 7.28 – Антенный блок (датчик) прибора «Раскан-3»

Для обнаружения дефектов в строительных конструкциях более важным параметром радара, чем максимальная глубина зондирования, становится минимальная глубина обнаружения дефекта. Снижения этой величины до значений 2–5 см представляет собой непростую техническую задачу, так как электромагнитный импульс проходит это расстояние за время порядка $2\text{--}3 \cdot 10^{-10}$ секунды.

Сам факт многообразия рассмотренных приборных средств дефектоскопии бетона и продолжающиеся работы по их совершенствованию свидетельствуют, что каждое из них, имея свои преимущества, тем не менее, не завоевали к настоящему времени «монополии» в практике дефектоскопии бетона.

Контролировать прочность бетона акустическими методами можно лишь в той мере, в какой показатели прочности могут быть связаны с показателями упругости. Связь эта неоднозначна и зависит от большого числа факторов и, в первую очередь, от соотношения компонентов бетона и условий его укладки, уплотнения и твердения.

Выявление неоднородности бетона, присутствия структурных нарушений, макро- дефектов, оценка параметров упругости и пластичности является предпочтительной областью использования ультразвукового импульсного метода в сравнении с механическими.

К достоинствам ультразвукового импульсного метода прохождения можно отнести его способность давать интегральную оценку качества бетона в некотором объеме, а не в отдельных точках, а также очень высокая, в сравнении с другими методами, чувствительность к структурным нарушениям – микро- и макротрещинам, высокая оперативность (при использовании современной аппаратуры).

Все используемые приборы ультразвукового контроля бетона (за исключением дефектоскопа А1220) являются измерителями скорости продольных волн. Применение сухого точечного контакта на малых базах прозвучивания (100–200 мм) стало, по существу, стандартом для приборов этого класса, несмотря на значительные потери акустической энергии в зонах контакта и связанные с этим погрешности измерения. СТК позволяет получать вполне достоверную информацию о прочностных параметрах бетона даже в случаях, когда другие методы неразрушающего контроля неприменимы, – например, из-за значительных неровностей контролируемой поверхности, дефектности тонкого поверхностного слоя бетона.

Применение СТК позволяет заметно повысить точность измерений при поверхностном контроле, что особенно важно для практики контроля в построечных условиях.

Несмотря на интенсивное развитие бесконтактных методов интродивидения на основе СВЧ электромагнитных волн, акустические методы (ультразвуковой, ИЕМ) сохраняют за собой лидирующие позиции в области дефектоскопии строительных конструкций.

Наблюдается тенденция к расширению практического применения низкочастотных акустических методов: «impact-echo», который составляет сильную конкуренцию ультразвуковым методам прохождения при обнаружении скрытых под поверхностью бетона трещин и других дефектов сплошности; и метода свободных колебаний, позволяющего потенциально контролировать состояние конструкций целиком.

7.3. Рекомендации по проведению контроля прочности бетона неразрушающими методами

Влияние состояния поверхности испытуемого изделия и неоднородности бетона на оценки прочности бетона неразрушающими методами

Определяя прочность бетона конструкции, следует иметь в виду, что массив бетона не является однородным по своим физико-механическим свойствам. Основными факторами, влияющими на степень однородности бетонного массива, являются условия уплотнения бетонной смеси при укладке, ее подвижность, различие температурного и влажностного режимом твердения внутренних и внешних областей конструкции. Поэтому, во избежание просчетов в оценке несущей способности обследуемой конструкции, выбор зон ее контроля и их количество следует производить так, чтобы возможные различия, в первую очередь прочностных показателей, зафиксировать.

Неоднородность бетона по прочности, влияя на несущую способность конструкции, создает и дополнительные сложности в использовании неразрушающих методов контроля, поскольку характер и степень влияния вариации прочности бетона конструкции и

бетона испытательных градуировочных образцов на вариацию косвенных показателей неразрушающих методов могут заметно различаться.

На рис. 7.29 приведено распределение по толщине оценок прочности бетона монолитной плиты перекрытия в возрасте 4,5 суток.

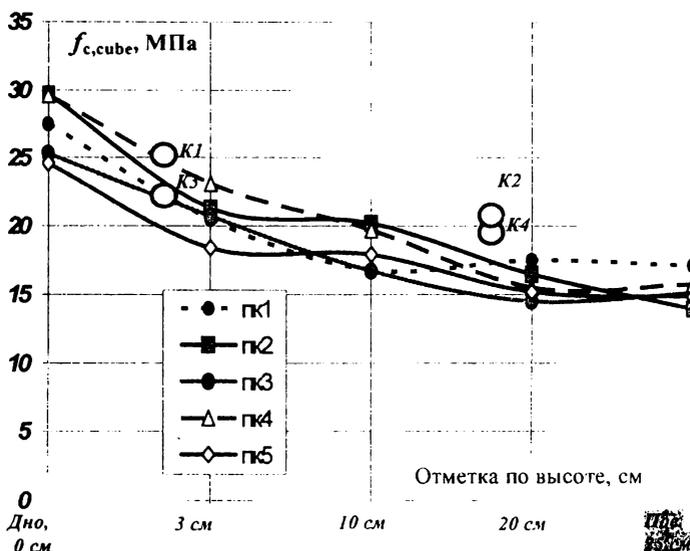


Рисунок 7.29 – Распределение прочности бетона плиты перекрытия толщиной 0,25 м по высоте сечения, по результатам ультразвуковых измерений: проектный класс бетона по прочности С25/30; К1, К2, К3, К4 – отметки проб кернов; возраст 4,5 сут.; прочность бетона по данным прессовых испытаний образцов-кубов – 21,2 МПа

Испытания показали сопоставимость результатов оценки прочности бетона, полученных ультразвуковым импульсным методом на верхней открытой поверхности плиты (пов. 25 см) и на стенке проема, на 3 см ниже уровня поверхности. Разница в оценках прочности не превышала 5—7%. Несколько большее отличие оценок прочности бетона ультразвуковым методом от средней по сечению плиты наблюдается при контроле донной зоны, здесь разница достигает 25—30%. Характерным для ультразвукового метода является бóльшая разница оценок прочности бетона по высоте плиты, в

сравнении с данными прессовых испытаний кернов: для ультразвукового метода разница составила ~ 34 %, для кернов – 17,5 %.

Также следует заметить, что результаты ультразвуковых измерений на неподготовленной поверхности плиты хорошо совпадают с данными измерений на подготовленной боковой поверхности проема, на расстоянии 5—7 см от поверхности плиты. Данное обстоятельство указывает на эффективность ультразвукового поверхностного контроля приборами с сухим точечным акустическим контактом монолитных плит.

Состояние поверхности контролируемой конструкции имеет большее значение для методов индентирования. Использование точечного акустического контакта позволяет практически не принимать во внимание неровность поверхности при ультразвуковом контроле.

Для механических методов испытаний картина также большую роль играет фактор времени: на самой начальной стадии твердения (1—2 сут), когда бетон ещё «мягкий», качество поверхности практически не проявляет себя на результатах измерения; по мере набора прочности «поверхностная» оценка начинает «отставать» от средней по сечению изделия, достигая к 28 суткам лишь 50—70 % от средней по данным испытаний изъятых из конструкции кернов. При контроле плит перекрытий/покрытия (срок твердения 28 суток и более) данные ультразвукового контроля практически совпадают с данными испытаний кернов. Данные испытаний склерометром ОМШ-1 могут сильно различаются, в частности, для бетона проектного класса по прочности С25/30 средняя оценка прочности для верха испытанных плит перекрытий составляла 18 МПа и 32 МПа – для нижней поверхности.

Это позволяет для оценки начальной стадии твердения бетона (от 1 до 4 сут), когда нет доступа к нижней поверхности плиты, рекомендовать механические методы контроля, как более надежные и менее технологозависимые. По мере твердения бетона это их достоинство теряется, и преимущество переходит к ультразвуку.

Кроме слабой чувствительности к присутствию неровностей на поверхности контроля (при использовании сухого точечного контакта), ультразвук в большей степени, чем механические методы, оценивает подповерхностные слои бетона. Для ультразвукового прибора УК1401 (база прозвучивания 150 мм, частота зондирую-

ших импульсов около 50–70 кГц) на оценку прочности влияет слой бетона толщиной около $\lambda/2$, что составляет около 3...3,5 см. Оценки механических методов в большей степени зависят от качества и свойств поверхности бетона.

На рис. 7.30 представлены данные испытания бетонных полов, выполненных с упрочнением верхнего слоя механическим втиранием упрочняющего компонента УК-1 (фирма «Бирсс»).

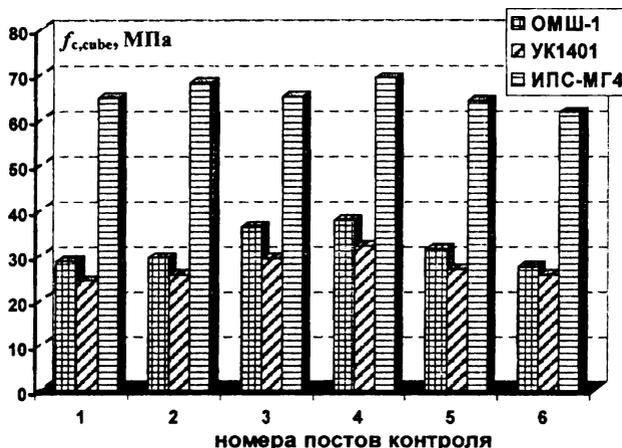


Рисунок 7.30 – Распределение оценок прочности бетонной плиты с упрочняющим слоем по данным неразрушающего контроля (возраст бетона 35 сут)

Основание пола (толщина примерно 5–7 см) выполнено из бетона класса С25/30. Упрочнению подвергался верхний слой бетона толщиной 3–4 мм путем втирания в незатвердевшую стяжку упрочняющего состава. Данные ультразвуковых испытаний дали оценку прочности соответствующую средней прочности бетонного массива в пределах 24–32 МПа. Данные механических испытаний различались более чем в два раза, причем показания склерометра ОМШ-1, имеющего большую энергию удара, были ближе к данным ультразвукового метода, но имели значительный разброс – от 25 до 52 МПа, что, вероятно, связано с различием в толщине упрочненного бетонного слоя выбранных зон контроля. Оценки ударно-импульсного метода (ИПС-МГ4) достаточно ровные и соответствуют прочности 62–69 МПа.

Такая картина распределения оценок прочности бетона для разных методов однозначно говорит о том, что в приведенном случае ударно-импульсный метод, реализуемый прибором ИПС-МГ4, принимает во внимание прочность (твердость) верхнего упрочненного слоя. ОМШ-1, имеющий значительно большую энергию удара, фактически «проламывает» верхний твердый слой, за счет чего его оценка прочности снижается и приближается к значению прочности бетонной стяжки.

Влияние армирования на результаты ультразвукового контроля бетона

Одним из технологических факторов, влияющих на точность оценок прочности бетона ультразвуковым импульсным методом по ГОСТ 17624-87, приводящим, как правило, к завышению прочности, является армирование в зоне контроля, поскольку скорость распространения акустических колебаний в стальной арматуре лежит в пределах от 5700 до 6200 м/с, превосходя на 50–70 % скорость ультразвука в зрелом бетоне. Высокая чувствительность ультразвукового импульсного метода к изменению скорости распространения зондирующего импульса, составляющая 2,5–3,5 % прироста оценки прочности при возрастании скорости УЗ импульса на 1 %, ставит фактор влияния армирования при определении прочности бетона в один ряд с факторами вариации состава бетона, его влагосодержания, и срока твердения.

Сомнения в точности определении скорости УЗ импульса при испытаниях армированного бетона приборами с фиксированной базой измерения («Пульсар-1.1/1.2», УК1401, «Бетон-22/32») достаточно эффективно устраняются предварительной проверкой самого факта влияния арматуры. Для этого производится несколько контрольных измерений в областях наибольшего и наименьшего влияния армирования, которые легко локализовать, используя измерители защитного слоя бетона: «ПОИСК-2.51/2.52», ИПА-МГ4 (рисунок 7.31), «Armoscan», «Profoscor» и им подобные.

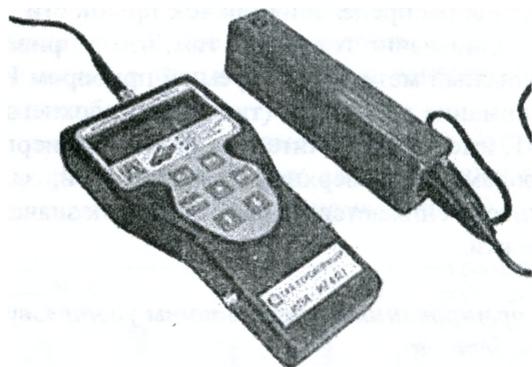


Рисунок 7.31—Прибор обнаружения арматуры ИПА-МІ 4

В области потенциально максимального влияния арматуры, измерения рекомендуется провести дважды, - ориентируя направление прозвучивания параллельно арматурному стержню и перпендикулярно (или под углом 45°) к нему. Устойчивая разница (или ее отсутствие) полученных значений скорости ультразвука подсказывает очевидный выбор дальнейших действий при осуществлении контроля конструкции.

Разумеется, описанная методика не решает вопроса о степени влияния арматуры, а лишь позволяет выявить случаи его проявления⁵.

Для поверхностного прозвучивания конструкций (см. рис. 7.32) фактор влияния армирования проявляется в наибольшей степени, если направление прохождения зондирующего сигнала совпадает с направлением осей ближайших стержней арматуры.

⁵ В качестве дополнительного информационного параметра, позволяющего зафиксировать сам факт присутствия армирования или какой-либо неоднородности в зоне контроля, может рассматриваться длительность первой полуволны принятого акустического импульса. Возможность таких измерений предусмотрена в приборах УК1401 и «Пульсар», но их выполнение требует высокой квалификации оператора.

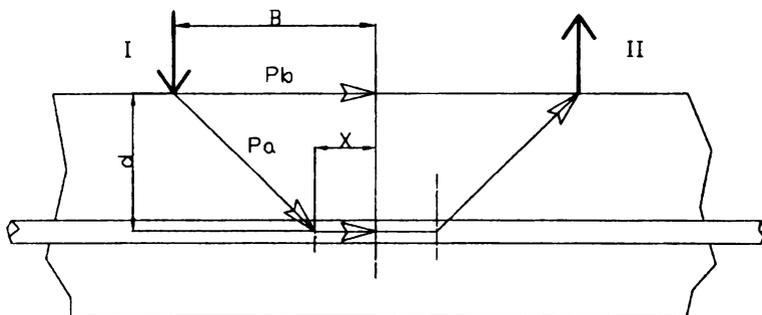


Рисунок 7.32 – Схема пути прохождения УЗ импульса в зоне армирования

Из точки излучения I в точку приема II (см. рис. 7.32) импульс может попасть двумя путями: либо непосредственно через бетон – по кратчайшему пути, либо пройдя часть пути по арматуре, затратив меньшее время. Критического значения величина d достигает в случае, когда оба пути займут одинаковое время. Зависимость критической глубины залегания арматуры от скорости УЗК и базы измерения описывается формулой

$$d_{кр} = B \cdot \sqrt{\frac{1-w}{1+w}}, \quad (7.18)$$

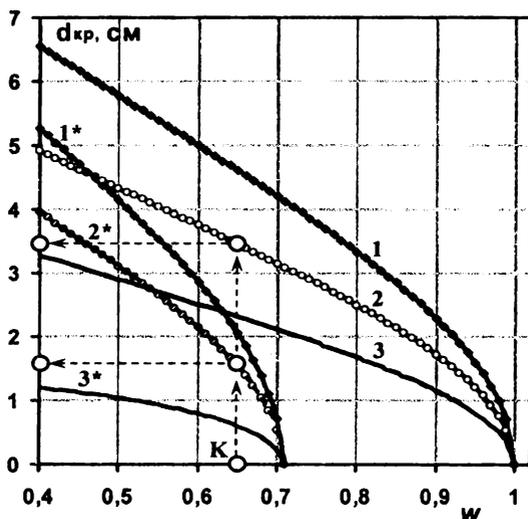
где $w = c_b/c_a$; c_a и c_b – скорость УЗ импульса соответственно в арматуре и бетоне.

На рисунке 7.33 приведены графики этой зависимости для баз прозвучивания 100, 150 и 200 мм.

Для принятого типового соотношения скоростей c_b и c_a , критическая толщина защитного слоя составляет около 3,5 см (для базы прозвучивания 150 мм).

При «диагональной» ориентации направления прозвучивания по отношению к арматурной сетке (кривые 1*–3* на рисунок 7.33) критическая глубина залегания арматуры уменьшается, так как подобное расположение точек контакта эквивалентно уменьшению скорости ультразвукового импульса в арматуре в $\sqrt{2}$ раз. Критическая толщина защитного слоя составит в этом случае около 1,6 см, что для подавляющего большинства монолитных изделий ниже нормированной толщины защитного слоя. Увеличение базы прозвучивания до

200 мм приводит к прямо пропорциональному росту критической толщины защитного слоя бетона (до 2,2 см), которое уже достигает нормированного значения.



1, 1* – база прозвучивания $2B = 200$ мм; 2, 2* – $2B = 150$ мм;
3, 3* – $2B = 100$ мм; точка К соответствует значениям скоростей:
 $c_б = 3800$ м/с, $c_а = 5900$ м/с

Рисунок 7.33 – Зависимость критической глубины расположения арматуры от соотношения скоростей распространения УЗК в бетоне и арматуре

Степень влияния армирования, безусловно, зависит от диаметра арматуры и качества её сцепления с бетоном, оценить её количественно обычными аналитическими методами не представляется возможным. Необходимо подчеркнуть, что представленные расчеты справедливы только для продольной волны, регистрируемой по первому вступлению сигнала.

Минимизировать влияние армирования при поверхностном контроле бетона с использованием стандартных методик измерения можно «диагональной» ориентацией прибора на поверхности изделия, - направление прозвучивания должно составлять угол около 45° относительно стержней армирования. Это позволяет для тяжелых бетонов классов С16/20 и выше (для базы измерения 120 мм и шаге армирования более 150 мм) не учитывать наличие арматуры в

зоне контроля, если толщина защитного слоя превышает 15 мм (для арматуры диаметром до 20 мм). Для диаметра арматуры 25 мм минимальная толщина защитного слоя - 20 мм. Указанная рекомендация справедлива только для приборов, оценивающих скорость распространения УЗ импульса по фронту первого вступления сигнала («Пульсар-1.1/1.2», УК-14П). Также рекомендуется в процессе обработки результатов измерений осуществлять их селекцию, сопоставляя данные контроля, полученные с потенциально разной степенью влияния армирования.

Коррекция градуировочных зависимостей приборов неразрушающего контроля прочности бетона

Необходимость коррекции градуировочных зависимостей неразрушающих методов контроля прочности бетона связана с различиями в технологиях бетонирования крупногабаритных монолитных изделий и испытательных контрольных образцов бетона, а также различием условий их твердения. Ниже рассматривается алгоритм коррекции градуировок с использованием данных испытания бетона конструкций «экспертным» методом, непосредственно на строительной площадке. В качестве «экспертного» может использоваться метод определения прочности по образцам, отобраным из конструкции по ГОСТ 28570–90 (рисунок 7.34).

а).



б).

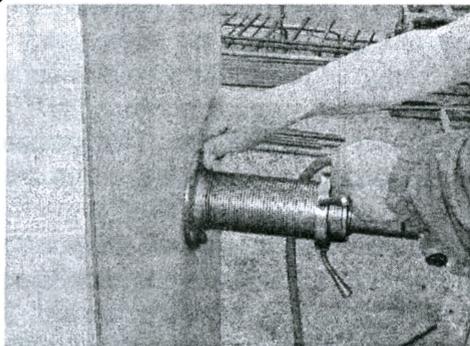


Рисунок 7.34 – Выборка образцов-кернов из монолитных конструкций:
а – из плиты перекрытия; б – из монолитной колонны

Поскольку произвести выборку кернов, особенно в конструкции небольшого сечения, не всегда представляется возможным по причине ее заметного ослабления, «вторым» по надежности может быть рекомендован метод отрыва со скалыванием по ГОСТ 22690–88.

Исходным моментом для выполнения коррекции является накопление массива данных о прочности бетона, полученных «экспертным» и неразрушающими методами для изделия больших размеров, например плит перекрытий, или групп нескольких однотипных изделий: колонн, балок, стеновых панелей. Производить коррекцию следует, если наблюдается устойчивое смещение средних оценок прочности бетона неразрушающими и экспертными методами для групп однотипных конструкций одного возраста, бетонировавшихся приблизительно в одно время и твердевших в одинаковых температурных условиях. Пороговым значением смещения оценок рекомендуется считать 15 % от оценки экспертного метода. На рис. 7.35 приведен алгоритм коррекции градуировочных зависимостей данными экспертного метода контроля. Основой алгоритма является следующая процедура. Вводятся дополнительные параметры градуировочной зависимости – её ранг и граничные значения (максимальный и минимальный) косвенного параметра неразрушающего метода, которые использовались при построении. В качестве значения ранга N градуировочной зависимости можно использовать количество точек массива данных, составлявших корреляционное поле. В соответствии с алгоритмом коррекции, интервал значений косвенного параметра H разбивается на $N-1$ равных отрезков, на границах которых H_j по имеющейся градуировочной зависимости производится расчет N значений прочности $f_c^q(H_j)$. К полученному массиву точек в координатах $\{f_c^q; H\}$ добавляется Z точек полученных экспертным методом. Построение скорректированной градуировочной зависимости производится по обычной методике для $N+Z$ точек.

Предлагаемая процедура коррекции инвариантна по отношению к методу контроля, к виду аппроксимирующей функции и позволяет выполнять коррекцию многократно. Заложенный механизм накопления данных обеспечивает последовательное уточнение зависимости.

Изменения коснулись, главным образом, участков кривых, соответствующих высоким значениям прочности, – от 40 МПа и выше.

По статистическим данным испытаний монолитных изделий из бетона классов С25/30...С35/45 в построечных условиях, использование методики коррекции позволило снизить остаточную среднюю квадратическую погрешности измерения прочности до 7...13 % для диапазона сроков твердения бетона от 2 до 60 суток.

Методика оценки поверхностных трещин ультразвуковым методом

Трещина в бетоне (рис. 7.36), даже в самой ранней стадии раскрытия, является препятствием для распространяющейся упругой волны. Огибая трещину, точнее говоря - переизлучаясь на ее вершине (точка С) – волна ослабляется, а поскольку путь ее распространения становится длиннее, то наблюдается также снижение скорости УЗК. Способность трещины влиять на указанные характеристики упругой волны составляет физическую основу временного теневого метода обнаружения трещин. Используя метод продольного профилирования удастся обнаруживать локальные приповерхностные дефекты бетона, местоположение которых определяется скачкообразным увеличением времени распространения акустического импульса.

Глубину трещины d можно определить путем сравнения времени распространения ультразвуковых колебаний t_0 в бездефектной области и в области трещины - t (рис. 7.36, а), по формуле

$$d = a \sqrt{\left(\frac{t^2}{t_0^2} - 1 \right)}. \quad (7.19)$$

Временной теневой метод используют для обнаружения трещин, возникающих в железобетонных конструкциях при их нагружении, причем появление трещин регистрируется надежнее, чем другими известными методами. Несмотря на то, что основа рассмотренного L-L метода (рис. 7.36, а) оценки трещин очевидна и на первый взгляд не вызывает сомнений, на практике часто наблюдаются значительные расхождения в оценках глубины трещин ультразвуком и щупом (0,05 мм). Причем данные ультразвуковых оценок могут в несколько раз превосходить непосредственные замеры. Ошибка вызывается значительной разницей уровней УЗ сигналов в бездефектной зоне

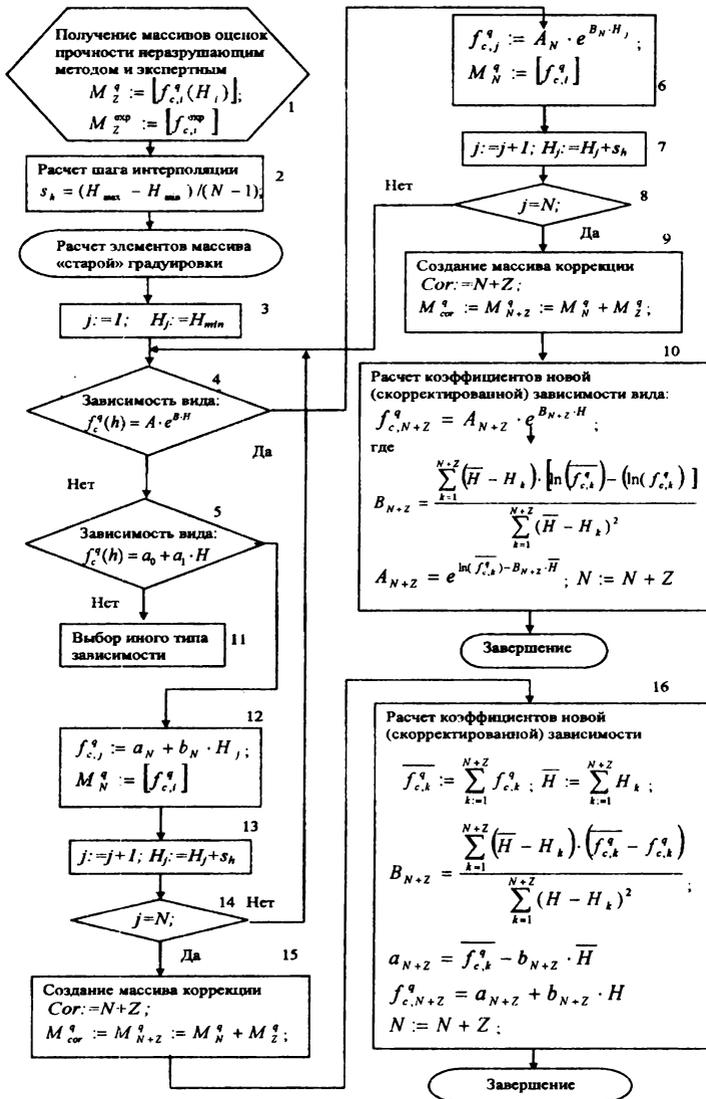
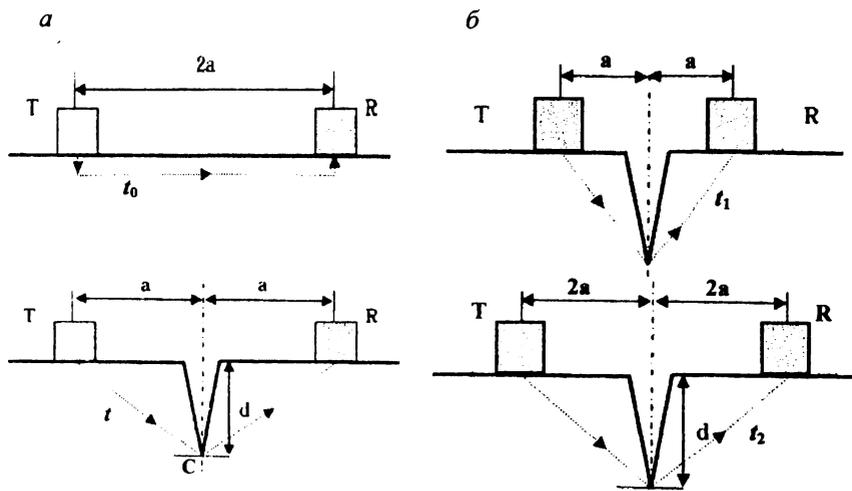


Рисунок 7.35 – Алгоритм коррекции градуировочной зависимости неразрушающего метода данными экспертного метода контроля:
 H – косвенный параметр; Z – количество полученных экспертных оценок прочности в обследуемой пикетной зоне; H_{max} , H_{min} – нижняя и верхняя граница косвенного параметра для градуировочной зависимости соответственно; $f_{c,i}^{exp}$, $f_{c,i}^q$ – оценки прочности бетона экспертным и неразрушающим методами

и в зоне трещины. Амплитуда первого полупериода УЗ сигнала после его переизлучения трещиной становится меньше порога чувствительности прибора.



Т – излучатель УЗК; R – приемный преобразователь
 Рисунок 7.36 – Схемы временного теневого метода обнаружения трещин:
 а – L – L метод; б – BS метод

В результате, первое вступление «проскакивает» на приеме незамеченным, а прибор улавливает второе или третье, имеющих большую амплитуду, момент появления которых значительно сдвинут во времени. Это и приводит к завышенной оценке глубины трещины.

В определенной мере от этого недостатка свободен так называемый BS метод (рис. 7.36, б), в соответствии с которым оба измерения времени распространения УЗК производят в области трещины, изменяя базу измерения в два раза. Глубину трещины в этом случае рассчитывают по формуле

$$d = a \sqrt{\left(\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2} \right)}. \quad (7.20)$$

Приборы с сухим точечным акустическим контактом, обеспечивая высокую оперативность измерений, позволяют путем сканиро-

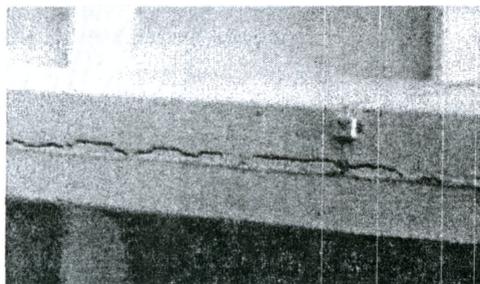
вания поверхности железобетонных конструкций производить оценку их трещиноватости и отслеживать ее развитие. Наиболее опасными являются развивающиеся трещины в зонах армирования конструкции, поскольку проникающая через них вода и кислород воздуха интенсифицируют коррозию стальной арматуры. В качестве примера ниже приведены результаты оценки трещиноватости элементов перекрытия здания производственного цеха завода асбестоцементных изделий АО «Красносельскстройматериалы». Перекрытие состояло из 120 секций, каждая площадью 24х6 м., а каждая секция – из восьми ребристых железобетонных плит 3х6 м. Необходимость в обследовании была продиктована проявлением деструктивных процессов, выразившихся в образовании трещин (рис. 7.37, а) в зоне армирования плит перекрытия вследствие коррозии арматуры⁶.

Предварительно был выполнен этап визуальной локализации зон с явными признакам повреждений бетона, а также выполнена оценка степени повреждений бетона. На рисунке 7.38 приведен план распределения плотности визуально регистрируемых дефектов по площади покрытия.

Ультразвуковые измерения выполнялись для уточнения перечня дефектных плит. Методика измерений (рис. 7.37, б) состояла в обмерах ребер плиты в зонах предполагаемых дефектов и на боковой грани. Ребро и соответственно плита дефектовалась, если из 11 позиций профилирования 2 позиции имели выпадающие результаты. Выпадающими считались данные, отличающиеся от контрольных на 10 % в сторону увеличения времени прохождения зондирующего импульса. При наличии выпадающего результата делаются 1–2 уточняющих замера с небольшим сдвигом – 3–5 см точек контроля, если результат подтверждался, то он фиксировался.

⁶ Развитие трещин в зоне армирования может рассматриваться в качестве признака уже начавшейся коррозии арматуры.

а



б

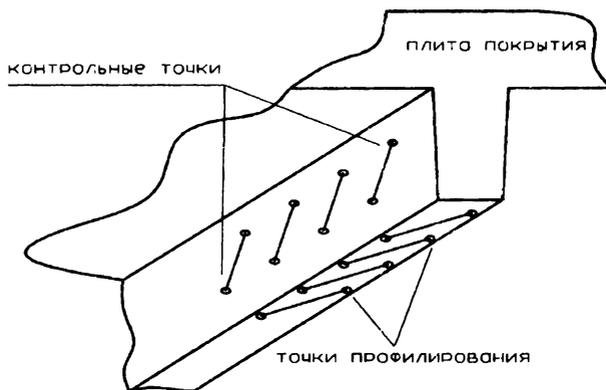


Рисунок 7.37 – УЗ контроль плит перекрытия

а – ребро дефектной плиты; б - схема поста контроля ребер плиты перекрытия

На рисунке 7.39 приведен план распределения плотности оценок дефектности плит по площади покрытия. Общий характер картины ультразвуковых оценок числа дефектов в основном повторяет данные визуальных оценок. Но в то же время, многие секции, которые визуально не оценивались как дефектные, по данным ультразвукового контроля содержали дефекты. И лишь отдельные секции не проявили признаков деструкции. Количество зарегистрированных секций покрытия как дефектных увеличилось по оценкам ультразвуковых измерений с 46 % - по данным визуального контроля, до 78 %. Значения глубины большинства зафиксированных трещин находилось в пределах 4–7 см, что соответствовало толщине защитного слоя бетона в ребрах плит перекрытия.

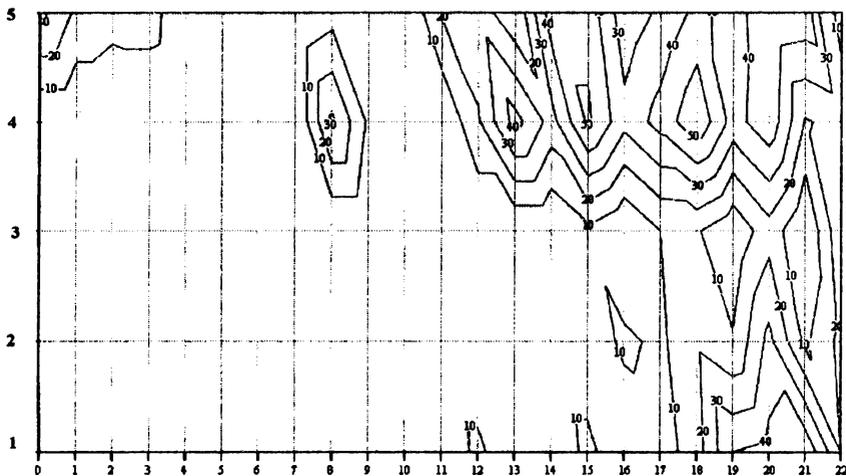


Рисунок 7.38 – Распределения плотности визуально наблюдающихся дефектов по площади покрытия цеха завода АЦИ

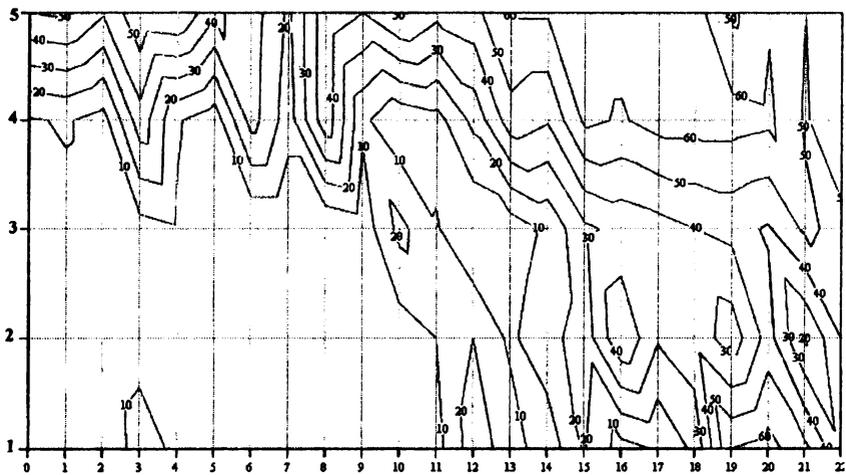


Рисунок 7.39 – Распределения плотности дефектов зарегистрированных ультразвуковым методом контроля по площади покрытия цеха завода АЦИ

7.4. Оценка качества бетона железобетонных конструкций на основе европейских стандартов

Одним из характерных моментов, присущих европейским нормам является использование вероятностных подходов в системе оценки нормируемых параметров. Для бетона, к примеру, таким параметром в соответствии с EN 206-1 – Бетон. Часть 1. Технические требования, эксплуатационные характеристики, производство и соответствие требованиям (Beton — Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität) (рис. 7.40) является его класс по прочности. Напомним, что для класса по прочности характеристическим параметром является так называемая характеристическая прочность f_{ck} , которая определяется по данным испытаний бетонных образцов и имеющая статистическую обеспеченность 95 %. При этом средние значения прочности бетонов имеющих одинаковый класс, могут заметно отличаться. Чем больше вариация прочности бетона, тем выше должно быть ее среднее значение для обеспечения установленного класса. Такая система в оценке прочности бетона гарантирует с большой вероятностью соответствие его прочности проектным показателям, а с другой стороны - стимулирует производителя бетона к совершенствованию технологии, повышению ее стабильности и, как следствие, – к экономии цемента и снижению себестоимости бетона⁷.

⁷ В европейских нормах EN 206-1 используется понятие *семейство бетонов*. – группа бетонов, для состава которых установлены и задокументированы достоверные зависимости между соответствующими характеристиками (например, между Ц/В и прочностью), и которые приготавливаются с использованием цемента одного вида (типа) и класса, прочности (активности) от одного производителя и заполнителей одного вида и геологического происхождения (дробленного или недробленного).