

Методика определения градуировочной зависимости между прочностью бетона и скоростью распространения ультразвуковых колебаний и реализация ее на практике

Введение

Для определения механических свойств материалов строительных конструкций с целью выявления их состояния и ресурсов работоспособности применяют два подхода: нарушение целостности конструкции посредством отбора образцов для испытаний и неразрушающие методы определения искомых характеристик.

При обследовании конструкций широкое применение получили методы неразрушающего контроля, позволяющие полностью ликвидировать или свести к минимуму повреждения элементов здания, вызванные проведением обследования.

Неразрушающие методы контроля прочности бетона делят на механические и физические в зависимости от вида косвенных показателей, по которым определяют прочность бетона в изделиях и конструкциях. К физическим методам, применяемым при обследовании состояний конструкций, относятся: акустический, радиационный, магнитный и электромагнитный, электрический. Среди акустических наибольшее распространение получили ультразвуковой импульсный и ударный методы.

Выполнение работ по определению прочностных характеристик ультразвуковым методом регламентирует ГОСТ 17624-87 "Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности"

Актуальность работы и поставленные задачи

Метод ультразвукового контроля прочности бетона является наиболее эффективным по сравнению с остальными неразрушающими методами, поскольку он позволяет измерить прочностные характеристики не только поверхностного слоя бетона, но и интегральные параметры прочности.

Ультразвуковые измерения проводят приборами, предназначенными для измерения времени распространения ультразвука в бетоне и аттестованными в установленном порядке по ГОСТ 8.383. Основу парка ультразвуковых приборов предприятий строительного комплекса составляют приборы УК-10, УК1401, Пульсар, Бетон-32, УК-14П, УК-12, УК-14ПМ, УК-16ПС.

Основной функцией прибора УК-15М, используемого при обследовании зданий и сооружений, является определение прочностных характеристик бетонных конструкций посредством использования градуировочных зависимостей между скоростью (или временем прохождения) ультразвука. В базе используемого устройства не предусмотрены пользовательские градуировочные зависимости. Для применения прибора УК-15М при проведении измерений на строительной площадке или при обследовании эксплуатируемых конструкций с целью быстрого определения прочности бетона по измеренным значениям времени прохождения ультразвука необходимо использовать заранее установленные градуировочные зависимости применительно к бетонным конструкциям различного возраста и состава. Градуировочные зависимости устанавливаются в соответствии с разделом 3 ГОСТ 17624-87 и используются при условии, что измеренное значение скорости (или времени прохождения) ультразвука находится в пределах между наименьшим и наибольшим значениями скорости (времени прохождения) ультразвука в образцах, испытанных при построении градуировочной зависимости.

Целью работы является получение результатов испытаний бетонных образцов для описания методики установления градуировочной зависимости для определения прочности на сжатие на основе скорости ультразвука при сквозном способе прозвучивания бетона в возрасте 28 дней.

Примеры установления градуировочной зависимости, описанные в литературе, приведены в списке использованных источников.

Ультразвуковой метод определения прочности бетона

Физической основой ультразвукового метода определения прочностных параметров бетонных конструкций служит связь между прочностью бетона, из которого они изготовлены, и скоростью распространения в нем продольных ультразвуковых колебаний (УЗК).

Определение скорости УЗК производится посредством измерения времени распространения по материалу короткого механического колебания ультразвуковой частоты, называемого импульсом, от одного ультразвукового преобразователя (излучателя), возбуждающего это колебание в материале до другого (приемника), расположенного от излучателя на некотором расстоянии, называемом базой прозвучивания. При измерении времени t распространения ультразвукового импульса в микросекундах (мкс), а базы прозвучивания L в миллиметрах скорость УЗК v определяется по формуле

$$v = \frac{L}{t} \cdot 1000. \quad (1)$$

Для ввода в материал и приема УЗК используются преобразователи, основой которых являются элементы, материал которых обладает пьезоэлектрическим эффектом¹.

Ультразвуковые измерения в бетоне проводят способами сквозного или поверхностного прозвучивания в соответствии с Рис. 1.

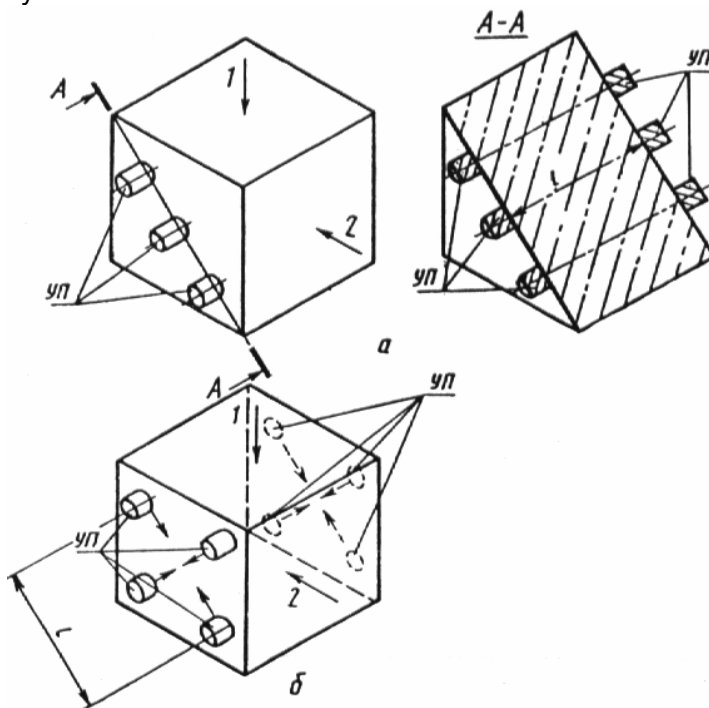


Рис. 1. а — схема испытания кубов способом сквозного прозвучивания;
б — схема испытания кубов способом поверхностного прозвучивания;
УП — ультразвуковые преобразователи; 1 — направление формования;
2 — направление испытания при сжатии; / — база прозвучивания

Прочность бетона в конструкциях определяют по экспериментально установленным градуировочным зависимостям "скорость распространения ультразвука — прочность бетона" или "время распространения ультразвука — прочность бетона" в зависимости от способа прозвучивания.

Градуировочную зависимость "скорость — прочность" устанавливают при испытании конструкций способом сквозного прозвучивания. База прозвучивания должна быть не менее 100 мм. Допускается базу прозвучивания снизить до 70 мм при проведении контроля

¹ Пьезоэлектрический эффект - возникновение электрической поляризации в веществе в отсутствие электрического поля при упругих деформациях (прямой пьезоэлектрический эффект) и появление механических деформаций под действием электрического поля (обратный пьезоэлектрический эффект). Пьезоэлектрический эффект наблюдается у всех сегнетоэлектриков и у многих пироэлектриков.

мелкозернистых бетонов и бетона на ранних стадиях твердения (скорость ультразвука менее 2000 м/с).

Градуировочную зависимость "время — прочность" устанавливают при испытании конструкций способом поверхностного прозвучивания. Минимальная база прозвучивания должна быть не менее 120 мм. Время распространения ультразвука следует измерять на поверхности, занимающей при изготовлении то же положение относительно формы и направления формования, что и контролируемая поверхность изделия.

Число измерений времени распространения ультразвука в каждом образце должно быть при сквозном прозвучивании 3, при поверхностном — 4.

Градуировочную зависимость устанавливают по результатам ультразвуковых измерений в бетонных образцах-кубах и механических испытаний тех же образцов.

Механические испытания образца проводят по ГОСТ 10180 непосредственно после ультразвуковых измерений.

При установлении градуировочной зависимости для определения прочности бетона в процессе естественного твердения сроки испытаний образцов необходимо выбирать из следующего параметрического ряда: 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180, 365 сут. Образцы испытывают не менее чем в трех возрастах, один из которых является проектным. В каждом возрасте испытывают не менее 4 серий образцов.

Одним из важных элементов, определяющих качество измерений скорости распространения УЗК, является обеспечение акустического контакта, необходимого для передачи энергии ультразвуковых волн от преобразователя к бетону. Эта акустическая связь осуществляется при помощи согласующей среды, в качестве которой могут использоваться солидол по ГОСТ 4366 или технический вазелин по ГОСТ 5774 и др. Контактная среда помещается между бетоном и рабочими поверхностями ультразвуковых преобразователей путем ее нанесения тонким слоем на бетон и поверхность преобразователя. Наличие согласующей среды уменьшает потери энергии УЗК, обусловленные различием акустических сопротивлений, а также обеспечивает плотный, без воздушного зазора контакт между поверхностями преобразователя и бетона.

В зоне контакта ультразвуковых преобразователей с поверхностью бетона не должно быть раковин и воздушных пор глубиной более 3 мм и диаметром более 6 мм, а также выступов более 0,5 мм. Поверхность бетона должна быть очищена от пыли.

Установление, проверка градуировочной зависимости и оценка ее погрешности проводится в соответствии с методикой, приведенной в Приложении 4 ГОСТ 17624-87.

Установление градуировочной зависимости

Для установления градуировочной зависимости "скорость — прочность" способом сквозного прозвучивания были залиты 6 серий бетонных кубиков разного состава, в каждой по 6 образцов.

Результаты измерений времени прохождения ультразвука в сроки естественного твердения бетона на 3, 7 и 28 дни сведены в табл. 1.

Градуировочная зависимость устанавливается для бетона на 28 день твердения по единичным значениям скорости (времени) ультразвука и прочности бетона.

За единичное значение прочности бетона принимается средняя прочность бетона в серии образцов, определенная по ГОСТ 10180.

За единичное значение скорости ультразвука принимается среднее арифметическое значение этих величин в серии образцов, используемых для определения единичного значения прочности.

Отклонение отдельного результата измерения времени распространения ультразвука в каждом образце от среднего арифметического значения результатов измерений для данной серии не должно превышать 2 %. Результаты измерения времени распространения ультразвука в образцах, не удовлетворяющих этому условию, не учитываются при расчете среднего арифметического значения скорости распространения ультразвука в данной серии образцов. Учет значений в результате отбраковки единичных измерений приведен в табл. 2.

Согласно методике установления градуировочной зависимости по ГОСТ 17624-87, среднее значение прочности (\bar{R}_f), МПа, и скорости ультразвука (\bar{v}), м/с, определяется по формулам:

$$\bar{R}_\phi = \frac{\sum_{j=1}^N R_{j\phi}}{N}; \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^N x_j}{N}; \quad (3)$$

где: N — число серий образцов, испытанных при установлении градуировочной зависимости;

x — скорость распространения ультразвука;

$R_{j\phi}$, x_j — единичные значения прочности и скорости распространения ультразвука для j -й серии образцов;

R_{\max} , R_{\min} — максимальное и минимальное значения прочности по испытанным сериям образцов, МПа.

Согласно формулам (2) и (3):

$$\bar{R}_\phi = \frac{36,62 + 28,84 + 30,64 + 30,82 + 19,65 + 24,89}{6} = 28,58 \text{ МПа};$$

$$\bar{v} = \frac{6388,61 + 6329,18 + 6229,17 + 6209,54 + 5844,18 + 5805,04}{6} = 6134,22 \text{ м/с}.$$

Минимальное и максимальное значения прочности составляют: $R_{\min} = 19,65$ МПа и $R_{\max} = 36,62$ МПа (5 и 1-я серии образцов).

Поскольку $R_{\max} - R_{\min} = 36,62 - 19,65 = 16,97$ МПа, т. е. менее чем $2 \cdot 28,58 \cdot \frac{60 - 28,58}{100} = 17,96$ МПа, то уравнение искомой зависимости принимается линейным:

$$R = a_0 + a_1 x. \quad (4)$$

Необходимые расчеты приведены в табл.3.

Коэффициенты a_1 и a_0 определяются по формулам (5) и (6):

$$a_1 = \frac{\sum_{j=1}^N (\bar{R}_\phi - R_{j\phi})(\bar{x} - x_j)}{\sum_{j=1}^N (\bar{x} - x_j)^2}; \quad (5)$$

$$a_0 = \bar{R}_{\text{тм}} - a_1 \bar{x}. \quad (6)$$

Тогда

$$a_1 = 0,020217;$$

$$a_0 = -95,44.$$

Искомая градуировочная зависимость имеет вид

$$R_n = 0,020217v - 95,44$$

и приведена на Рис. 2.

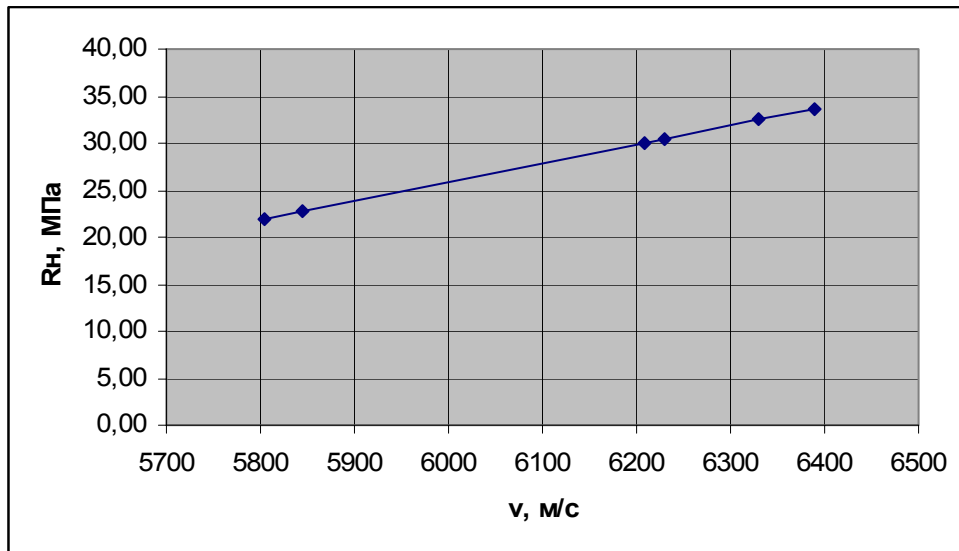


Рис. 2. Градуировочная зависимость $R_n = 0,020217v - 95,44$.

Корректировка установленной градуировочной зависимости проводится путем отбраковки единичных результатов испытаний, не удовлетворяющих условию

$$\frac{|R_{jn} - R_{j\phi}|}{S} \leq 2, \quad (7)$$

где: S — остаточное среднее квадратическое отклонение, определенное по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (R_{j\phi} - R_{jn})^2}{N - 2}}. \quad (8)$$

Согласно формуле (8):

$$S = 3,19.$$

При сравнении значения фактической прочности $R_{j\phi}$ в сериях образцов с прочностью R_{jn} , определенной по градуировочной зависимости (см. табл. 2), установлено, что условие (7) выполняется для всех серий.

Таким образом, полученная градуировочная зависимость в корректировке не нуждается.

Таблица 1

Партии		Партия 1, В40						Средн	Партия 2, В30						Средн	Партия 3, В25						Средн	Партия 4, В20						Средн	Партия 5, В15						Средн	Партия 6, В10						Средн																		
		1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6																			
Дата заливки		28.03.2006							28.03.2006							03.04.2006							03.04.2006		07.04.2006			07.04.2006							10.04.2006																										
Дата УЗ испытаний (3 день)		31.03.2006							31.03.2006							07.04.2006							07.04.2006		10.04.2006			10.04.2006							14.04.2006																										
		$v = L / t * 1000, \text{ м/с}$																														сквозное прозвучивание, база L=15 см																													
1	t, МКС	31	30	30	31	35	36	31,4	28	33	32	30	34	31	31,3	27	29	28	28	25	27	26	28	27,0	29	30	30	28	31	28	29,3	48	41	38	38	46	47	43,0	32	30	32	32	31	32	31,5																
2	t, МКС	32	33	26	34	36	34	33,8	44	40	42	48	39	31	42,60	28	28	28	27	27	30	26	28,00	29	29	29	28	35	28	29,67	38	36	38	38	41	47	39,67	33	33	32	33	33	30	32,33																	
3	t, МКС	52	52	36	54	53	41	52,75	52	53	53	48	54	50	51,67	33	29	33	26	28	28	29,50	29	29	27	33	28	28	29,00	40	40	38	37	41	31	37,83	29	32	33	34	33	31	32,00																		
								32,6							36,97							28,17							29,33							40,17							31,94																		
Дата УЗ испытаний (7 день)		04.04.2006							04.04.2006							10.04.2006							10.04.2006		14.04.2006			14.04.2006							17.04.2006																										
УЗ Исп-я		$v = L / t * 1000, \text{ м/с}$																														сквозное прозвучивание, база L=15 см																													
1	t, МКС	25	24	23	26	27	27	25,33	28	25	26	23	26	24	25,33	27	27	27	27	27	26	28	27,00	27	30	28	25	25	25	26,67	32	27	28	29	33	28	29,50	30	31	30	31	31	30	30,50																	
2	t, МКС	25	25	24	26	27	27	25,67	25	26	26	24	25	24	25,00	29	27	27	26	26	26	28	26,83	28	27	28	25	28	27	27,17	31	28	29	30	33	28	30,17	30	30	27	31	28	29	29,17																	
3	t, МКС	25	###	23	26	27	26	25,50	25	25	27	24	25	24	25,00	27	30	26	25	30	28	27,67	31	29	31	27	25	25	28,00	30	29	31	30	37	29	31,00	30	31	27	32	28	31	29,83																		

Таблица 2

ω	N		→		t, МКС	V, М/С	t, МКС	V, М/С	t, МКС	t, МКС	(28 ДЕНЬ)
	V, М/С	t, МКС	V, М/С	t, МКС							
6388,61	6522	23	6522	23	23	6522	23	6522	23	23	25.04.2006
23,50	6250	24	-	-	-	6250	24	6250	24	24	
	6250	24	6818	22	22	-	-	-	-	-	25.04.2006
	6250	24	6250	24	24	6250	24	6250	24	24	
	-	-	-	-	-	6250	24	6250	24	24	25.04.2006
6329,18	-	-	6317,93	23,75	23,00	6317,93	23,75	6317,93	23,75	23,75	
23,56	6522	23	6000	25	25	6250	24	6250	24	24	01.05.2006
	6250	24	6250	24	24	6522	23	6522	23	23	
	6000	25	6000	25	25	6250	24	6250	24	24	01.05.
	6818	22	6522	23	23	6818	22	6818	22	22	
	6522	23	6522	23	23	6522	23	6522	23	23	05.05.
6329,18	6250	24	6250	24	24	6521,7	23	6521,7	23	23	
23,56	6393,61	23,50	6257,25	24,00	24,00	6480,57	23,17	6480,57	23,17	23,17	05.05.2006
	-	-	6000	25	25	6250	24	6250	24	24	
	-	-	6250	24	24	6250	24	6250	24	24	08.05.2006
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6229,17	6250	24	-	-	-	6250	24	6250	24	24	01.05.
24,08	6250	24,00	6187,50	24,25	24,25	6250,00	24,00	6250,00	24,00	24,00	
	6250	24	6250	24	24	6000	25	6000	25	25	05.05.2006
	6250	24	6250	24	24	6250	24	6250	24	24	
	6250	24	6000	25	25	6250	24	6250	24	24	05.05.2006
	6250	24	6250	24	24	6250	24	6250	24	24	
6209,54	6000	25	6250	24	24	6521,7	23	6521,7	23	23	05.05.2006
24,17	6167	24,33	6208,33	24,17	24,17	6253,62	24,00	6253,62	24,00	24,00	
	6000	25	6000	25	25	5769	26	5769	26	26	05.05.2006
	6000	25	5556	27	27	5357	28	5357	28	28	
	-	-	6000	25	25	5769	26	5769	26	26	05.05.2006
	5769	26	5769	26	26	6000	25	6000	25	25	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	05.05.2006
5844,18	5769,23	26	5769,23	26	26	6250	24	6250	24	24	
25,70	5885	25,50	5818,80	25,80	25,80	5829,12	25,80	5829,12	25,80	25,80	08.05.2006
	6000	25	6000	25	25	6250	24	6250	24	24	
	5769	26	5556	27	27	5769	26	5769	26	26	08.05.2006
	5556	27	5556	27	27	5769	26	5769	26	26	
	5556	27	5769	26	26	6000	25	6000	25	25	08.05.2006
	5172	29	6000	25	25	5769	26	5769	26	26	
5805,04	6000	25	6000	25	25	6000	25	6000	25	25	08.05.2006
25,89	5675,5	26,50	5813,39	25,83	25,83	5926,28	25,33	5926,28	25,33	25,33	

v = L / t*1000, м/с

сквозное прозвучивание, база L= 15 см

Таблица 3.

Дата испытаний	Серия	Время твердения, дн.	$R_{j\phi}$, МПа	v_j , м/с	$\overline{v-v_j}$, м/с	$(\overline{v-v_j})^2$, м/с	$(\overline{R_\phi} - R_{j\phi})$	$(\overline{v-v_j}) \cdot (\overline{R_\phi} - R_{j\phi})$	R_{jn} , МПа	$R_{j\phi} - R_{jn}$, МПа	$(R_{j\phi} - R_{jn})^2$, МПа ²	$\frac{ R_{jn} - R_{j\phi} }{S}$, МПа
1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14
28.04.	1	28	36,62	6388,61	-254,32	64678,66	-8,04	2044,73	33,72	2,90	8,419	0,91
28.04.	2	28	28,84	6329,18	-194,89	37982,11	-0,26	50,67	32,52	-3,68	13,521	-1,15
02.05.	3	28	30,64	6229,17	-94,88	9002,21	-2,06	195,45	30,50	0,14	0,021	0,05
02.05.- 05.05.	4	28	30,82	6209,54	-75,25	5662,56	-2,24	168,56	30,10	0,72	0,521	0,23
05.05.	5	28	19,65	5844,18	290,11	84163,81	8,93	2590,68	22,71	-3,06	9,375	-0,96
08.05.	6	28	24,89	5805,04	329,25	108405,56	3,69	1214,93	21,92	2,97	8,818	0,93
			28,58	6134,29		309894,93		6265,03			40,673	

Оценка погрешности определения прочности по результатам ультразвуковых измерений

Погрешность определения прочности бетона по установленной градуировочной зависимости вычисляется по формуле

$$S_m = \sqrt{S^2 + q^2 S_k^2}, \quad (9)$$

где: S_k^2 — среднеквадратическое отклонение коэффициента перехода (K). Так как коэффициент перехода не используется, то $S_k = 0$.

Значит

$$S_m = 3,19. \quad (10)$$

Поскольку $\frac{S_m}{R_{\phi}} \cdot 100\% = \frac{3,19}{28,58} \cdot 100\% = 11,2\% < 12\%$, то полученная градуировочная

зависимость может быть использована для контроля прочности бетона.

Заключение

Известно, что ультразвуковой метод используется для определения прочностных характеристик бетонных конструкций. Приборы УК-10, УК1401, Пульсар, Бетон-32, УК-14П, УК-12, УК-14ПМ, УК-16ПС составляют основу парка ультразвуковых приборов предприятий строительного комплекса. Сложность в использовании прибора УК-15М для определения прочности бетонных конструкций заключается в отсутствии в базе устройства пользовательских градуировочных зависимостей применительно к бетонным конструкциям различного возраста и состава. В связи с этим для применения прибора возникает необходимость установления таких зависимостей для бетона любого возраста и состава.

Целью работы является получение результатов испытаний бетонных образцов для описания методики установления градуировочной зависимости для определения прочности на сжатие на основе скорости ультразвука при сквозном способе прозвучивания бетона в возрасте 28 дней.

В проведенной работе для построения градуировочной зависимости «скорость распространения ультразвука — прочность бетона» было изготовлено 6 серий образцов, Количество испытываемых серий образцов является достаточным согласно п. 3.7 ГОСТ 17624-87. Градуировочная зависимость устанавливалась по значениям ультразвуковых измерений в бетонных образцах-кубах размерами 15×15×15см и механических испытаний тех же образцов по ГОСТ 10180 непосредственно после ультразвуковых измерений.

Результатом работы стало построение градуировочной зависимости между прочностью бетона и скоростью прохождения в нем УЗК для бетона в возрасте 28 дней при проведении измерений прибором УК-15М.

Погрешность определения прочности по установленной градуировочной зависимости обусловлена:

- рядом технологических факторов;
- скорость распространения ультразвука в бетоне сильно зависит от состава, водосодержания, возраста, дефектов, уменьшающих его прочность и др.;
- значительное влияние оказало изменение качества и количества крупного заполнителя, поскольку скорость ультразвука в бетоне в большей степени зависит от динамического модуля заполнителя, в то время как прочность определяется, в основном, растворной частью и качеством сцепления.

Существование устойчивой зависимости параметров распространения УЗК в бетоне от состояния его структуры, наличия и накопления в нём тех или иных дефектов и повреждений является главным достоинством ультразвукового метода при обследовании эксплуатируемых конструкций. Ультразвуковой метод, в отличие от остальных методов

неразрушающего контроля, обеспечивает выявление дефектов в бетоне на ранней стадии их появления и позволяет получить количественные оценки развития этих дефектов.

В связи с этим можно сделать вывод: прибор УК-15М, главным образом, может быть использован для определения места нахождения дефектов по времени прохождения ультразвука в конструкции, чем для определения прочностных характеристик бетона. Необходимость установления градуировочных зависимостей для непосредственного применения УК-15М усложняет эксплуатацию прибора и приводит к погрешности при определении прочности по установленной градуировочной зависимости.

Список использованных источников

1. ГОСТ 17624-87 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности»
2. ГОСТ 10180-90 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам»
3. www.stromros.ru/penobeton/070030050.htm&text
4. www.electroinfo.ru/magazine/%3Fid%3D326