

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ БЕТОНА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

А.Г. Алимов, В.В. Карпунин, П.В. Часовской

ГНУ ПНИИЭМТ Россельхозакадемии, г. Волгоград, Россия

Определение прочности и модуля упругости бетона непосредственно в конструкциях и сооружениях необходимо в связи с обеспечением их надёжности и долговечности в процессе строительства, реконструкции и эксплуатации, для установления фактической несущей способности, уточнения расчётных коэффициентов запаса и контроля за их напряжённым состоянием.

Известен способ определения модуля упругости бетона по ГОСТ 24452-80 [1], включающий механические испытания бетонных образцов – призм квадратного сечения или цилиндров круглого сечения с отношением высоты к ширине (диаметру), равным 4, и тензометрические испытания по определению приращения упруго-мгновенной относительной продольной деформации бетонных образцов при действии на них циклично-ступенчатой осевой сжимающей нагрузки до уровня 30 % разрушающей нагрузки на гидравлическом прессе и расчёт модуля упругости бетона по результатам механических и тензометрических испытаний бетонных образцов.

Указанный способ в данном стандарте является разрушающим и трудоёмким. Более того, этот способ не приемлем для определения модуля упругости бетона в реальных конструкциях сооружений без их локального разрушения.

Теоретическими исследованиями установлено, что скорость распространения упругих ультразвуковых колебаний является характеристикой, функционально связанной с такими важными свойствами, как упругость и плотность материала. Поэтому по скорости распространения ультразвуковых волн можно судить о качестве строительного материала и его состоянии [2].

Наиболее простым и достаточно надёжным способом определения модуля упругости бетона является применение сравнительного ультразвукового метода испытаний [3].

Сравнительный метод основан на использовании корреляционных (статических) связей между скоростью распространения ультразвуковых колебаний и начальным (статическим) модулем упругости бетона ($E_0 = f(c)$). Эти связи устанавливаются на партии опытных бетонных образцов, прошедших акустические, тензометрические и механические испытания [3].

Однако вышеуказанный способ не учитывает влияние влажности бетона в конструкциях сооружений на скорость распространения в нём ультразвуковых колебаний (УЗК). Экспериментально установлено [4], что с увеличением влажности бетона значительно возрастает в нём скорость распространения УЗК. Поэтому определение модуля упругости влажного бетона в существующих конструкциях, например гидротехнических или

гидромелиоративных сооружений, а также фундаментов, находящихся в эксплуатации зданий и различных сооружений при близком залегании уровня грунтовых вод, по градуировочной зависимости, экспериментально установленной по результатам ультразвуковых, тензометрических и механических испытаний бетонных образцов естественной влажности (0 – 1,5 %, т.е. практически «сухого» бетона), осуществляется с большой погрешностью, величина которой составляет 15 – 75 %.

Известны фундаментальные научные работы [5, 6], в которых предлагаются сейсмоакустические методы исследования упругих и деформационных свойств горных пород, основанные на сопоставлении данных о скоростях продольных волн в сухих и водонасыщенных породах. Однако применить эти методы к бетону без дополнительных исследований не представляется возможным из-за значительной неоднородности этого гетерогенного материала конгломератной природы, зернистые компоненты которого, занимающие 80-85% объёма, характеризуются значительными вариациями по прочности, форме и размерам. Кроме того, вклад в общую неоднородность бетона вносит и технология его изготовления в условиях строительства с трудно контролируруемыми последовательными этапами этой технологии [7].

В ГНУ ПНИИЭМТ Россельхозакадемии проведены комплексные экспериментальные и теоретические исследования по оценке влияния водонасыщения бетона на скорость распространения ультразвуковых волн [4], на основе которых нами разработан новый метод ультразвукового контроля модуля упругости бетона гидротехнических сооружений (Решение ФГУ ФИПС о выдаче патента на изобретение по заявке №2010110178/28 от 09.11.2010 г.).

Разработанный метод включает измерение скорости ультразвука и влажности бетона в бетонных образцах – призмах квадратного сечения или цилиндрах круглого сечения с отношением высоты к ширине (диаметру), равным 4, и материале конструкций, механические испытания образцов бетона при действии на них циклично-ступенчатой осевой сжимающей нагрузки до уровня 30 % разрушающей нагрузки на гидравлическом прессе, тензометрические испытания по определению приращения упруго-мгновенной относительной продольной деформации образцов бетона при уровне нагрузки, равной 30 % разрушающей нагрузки, построение градуировочной зависимости «скорость ультразвука – модуль упругости бетона» по результатам ультразвуковых, тензометрических и механических испытаний образцов бетона и определение модуля упругости бетона в конструкции сооружения из зависимостей:

$$E_{\sigma}^* = k_1 \cdot a \cdot e^{k_2 \cdot \sigma \cdot C_{jk} \cdot m}; \quad (1)$$

$$\sigma = \sum_{j=1}^n (\bar{C}_0 - C_j) \cdot (\ln \bar{E}_{\sigma} - \ln E_{\sigma j}) / \sum_{j=1}^n (\bar{C}_0 - C_i)^2; \quad (2)$$

$$a = e^{k_3 \cdot (\ln \bar{E}_{\sigma} - \sigma \cdot \bar{C}_0)}; \quad (3)$$

$$m = (1 - 69 \cdot 10^{-5} W_k^{3,1}) / (1 - 69 \cdot 10^{-5} W_0^{3,1}); \quad (4)$$

$$\bar{E}_\sigma = \sum_{j=1}^n E_{\sigma j} / n; \quad (5)$$

$$\bar{C}_0 = \sum_{j=1}^n C_j / n; \quad (6)$$

$$\ln \bar{E}_\sigma = \sum_{j=1}^n \ln E_{\sigma j} / n, \quad (7)$$

где $k_1 = \text{кгс/см}^2$, $k_2 = 1/\ln (\text{кгс/см}^2)$, $k_3 = 1/[(1-m/c) \cdot \ln (\text{кгс/см}^2)]$ – коэффициенты размерности;

$e = 2,71828\dots$ - основание натуральных логарифмов;

E_σ^* - модуль упругости бетона в бетонных и железобетонных конструкциях, кгс/см^2 ;

\bar{E}_σ - средний модуль упругости образцов бетона, испытанных при установлении градуировочной зависимости, кгс/см^2 ;

n - число серий образцов, испытанных при установлении градуировочной зависимости;

$E_{\sigma j}$ - единичные средние значения модуля упругости бетона j -й серии образцов бетона с влажностью W_0 , испытанных при установлении градуировочной зависимости, кгс/см^2 ;

\bar{C}_0 - средняя скорость распространения ультразвука в образцах бетона с влажностью W_0 , испытанных при установлении градуировочной зависимости, м/с;

C_j - единичные средние значения скорости распространения ультразвука j -й серии образцов бетона с влажностью W_0 , испытанных при установлении градуировочной зависимости, м/с;

C_{jk} - средняя скорость распространения ультразвука в бетоне контролируемой зоны конструкции сооружения, м/с;

W_0 - средняя влажность образцов бетона, испытанных при установлении градуировочной зависимости, % (по массе);

W_k - средняя влажность бетона контролируемой зоны в конструкции сооружения, % (по массе).

Коэффициент m , определяемый по формуле (4), учитывает влияние влажности на скорость прохождения в нём ультразвука. При установлении градуировочной зависимости «скорость УЗК – модуль упругости бетона» значение коэффициента $m=1$ т.к. $W_k=W_0$. В этом случае формула (1), при подстановке в неё $m=1$, приобретает следующий вид:

$$E_\sigma^* = k_1 \cdot a \cdot e^{k_2 \cdot e \cdot C_{jk}} \quad (8)$$

Полученная формула (8) является универсальной теоретической основой для построения градуировочной зависимости «скорость УЗК (C_j) – модуль упругости бетона (E_0^*)», что согласуется с сравнительным методом испытаний [3].

В качестве примера, градуировочная зависимость « $C_j - E_0^*$ » построена по результатам комплексных исследований 60 бетонных цилиндрических образцов диаметром 20 см и высотой 80 см, изготовленных из бетонной смеси состава 1:2,1:5,35 (цемент: песок: щебень) при содержании цемента 280 кг/м³. Бетон данного состава относится к классу В22,5 по прочности на сжатие и достаточно широко применялся в гидротехническом и гидромелиоративном строительстве в период 1950-1990 гг.

Образцы – цилиндры испытывались в различном возрасте (от 2 до 180 суток) двумя способами: ультразвуковым методом с частотой колебаний 60-100 кГц и механическим способом на прессе. Всего выполнено ультразвуковым прибором УКБ-1М около 700 измерений скоростей распространения ультразвука. При этом в бетонных образцах цилиндрах выполнялось условие распространения УЗК как в неограниченной среде, т.е. $d \geq 2\lambda$, где d – диаметр образцов – цилиндров, а λ – длина «бегущей волны».

Испытание образцов – цилиндров на модуль упругости механическим способом производилось при действии циклично – ступенчатой сжимающей нагрузки по ГОСТ 24452-80 [1] на 150 – тонном гидравлическом прессе. Продольные деформации измерялись с помощью тензорезисторов по ГОСТ 21616-91 [8]. Приборы для измерения деформаций образцов устанавливались по четырём образующим цилиндра, развёрнутым под углом 90°. База измерения продольных деформаций бетона была для всех образцов постоянной и равная 200 мм.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований по определению градуировочной зависимости « $C_j - E_0^*$ » для бетона вышеуказанного состава представлены в таблице 1.

По результатам комплексных исследований бетонных образцов (табл. 1) установлено следующее:

- скорость распространения УЗК в бетонных образцах при их сквозном прозвучивании изменялась от 4200 до 5356 м/с, что составляет в среднем 4918 м/с;

- модуль упругости бетона при испытании бетонных образцов стандартным методом варьировал в пределах 184790-385509 кгс/см², что равно в среднем 299758,5 кгс/см²;

- модуль упругости бетона, установленный по скорости ультразвука в бетонных образцах на основе формулы (8), изменяется от 199761,0 до 377256,7 кгс/см², что составляет в среднем 299439,5 кгс/см²;

- расхождение результатов (погрешность) определения модуля упругости бетона в образцах варьирует в пределах от – 8,89 до 10,58 %, что равно в среднем 4,1 %.

Таким образом, величина скорости прохождения ультразвука C_j в

неувлажнённом бетоне отражает его качество, т.е. чем выше значение C_{jk} , тем выше значение модуля упругости бетона.

На основании графической интерпретации (рис.), после анализа и математической обработки методом наименьших квадратов [9] экспериментальных данных (табл. 1) установлена градуировочная зависимость «скорость распространения ультразвука C_j – модуль упругости бетона E_{σ}^* » (бетон по прочности на сжатие класса В 22,5; состав: цемент-1; песок-2,1; щебень-5,35; содержание цемента 280 кг/м³).

Таблица 1 - Результаты экспериментальных и теоретических исследований бетонных образцов по определению градуировочной зависимости модуля упругости бетона от скорости ультразвука (бетон по прочности на сжатие класса В 22,5; состав: цемент-1; песок-2,1; щебень-5,35; содержание цемента 280 кг/м³)

№ п/п	Скорость ультразвука при сквозном прозвучивании образцов C_j , м/с	Модуль упругости бетона		
		при испытании образцов на прессе [1] $E_{\sigma j}$, кгс/см ²	по скорости ультразвука на основе формулы (8) $E_{\sigma j}^*$, кгс/см ²	расхождение результатов $\Delta = \frac{(E_{\sigma j} - E_{\sigma}^*)}{E_{\sigma j}} \cdot 100, \%$
1	4200	184790	199761,9	-8,10
2	4276	211617	208288,9	1,57
3	4345	203473	216345,4	-6,33
4	4580	228383	246195,6	-7,80
5	4563	234132	243904,4	-4,17
6	4681	254252	260258,7	-2,36
7	4731	250419	267515,1	-6,83
8	4700	257605	262992,7	-2,09
9	4645	269581	255156,3	5,35
10	4662	272455	257553,2	5,47
11	4674	277246	259258,6	6,49
12	4683	284910	260545,1	8,55
13	4698	275808	262703,5	4,75
14	4710	271497	264443,1	2,60
15	4738	276287	268547,0	2,80
16	4736	264790	268251,8	-1,31
17	4833	262874	282951,7	-7,64
18	4838	276766	283730,8	-2,52
19	4860	277725	287184,8	-3,41
20	4864	282036	287817,3	-2,05
21	4840	281078	284043,1	-1,05
22	4848	284910	285295,7	-0,14
23	4832	286347	282796,1	1,24
24	4807	280599	278934,2	0,59
25	4786	282515	275731,1	2,40
26	4788	291138	276034,6	5,19

27	4757	291617	271368,1	6,94
28	4788	295449	276034,6	6,57
29	4798	300240	277556,9	7,55
30	4817	313653	280472,6	10,58
31	4905	296886	294381,4	0,84
32	4931	294012	298621,2	-1,57
34	4940	282994	300103,1	-6,05
34	4952	296407	302090,3	-1,92
35	5047	297844	318294,2	-6,87
36	5032	311737	315679,0	-1,26
37	5014	314132	312569,2	0,50
38	5027	316048	314812,1	0,39
39	5037	327545	316548,4	3,36
40	5096	310299	326988,8	-5,38
41	5150	309341	336846,0	-8,89
42	5169	313174	340384,5	-8,69
43	5147	313653	336290,7	-7,22
44	5125	316527	332246,1	-4,97
45	5135	320359	334078,5	-4,28
46	5103	331377	328250,2	0,94
47	5151	329940	337031,4	-2,15
48	5204	328024	347000,4	-5,79
49	5199	336168	346047,5	-2,94
50	5206	345269	347382,3	-0,61
51	5177	352455	341885,5	3,00
52	5106	358204	328792,2	8,21
53	5155	370180	337773,6	8,75
54	5230	351497	351998,2	-0,14
55	5292	364431	364208,3	0,06
56	5317	366826	369250,7	-0,66
57	5312	365389	368236,7	-0,78
58	5258	369222	357460,9	3,19
59	5231	385509	352191,8	8,64
60	5356	384072	377256,7	1,77
Средние значения	$\bar{C}_0 = 4918$	$\bar{E}_\sigma = 299728,5$	$\bar{E}_{\sigma j}^* = 299439,5$	$\delta_{cp} = \frac{\sum \delta_j }{n} = 4,1$
Примечание: средняя влажность образцов бетона, испытанных при установлении градуировочной зависимости « $C_j - E_\sigma^*$ », составляла $W_0 = 0,5$ % (по массе)				

Полученная градуировочная зависимость (рис. 1) описывается следующей возрастающей степенной функцией:

$$E_{\sigma j}^* = 19828,65 \cdot e^{5,5 \cdot 10^{-4} \cdot C_j}$$

(9)

На рисунке 1 показано корреляционное поле опытных точек и линия

регрессии при определении модуля упругости бетона ультразвуковым методом с использованием формулы (9) и путём испытаний на прессе [1] 60 бетонных образцов-цилиндров, приведенных в таблице 1. Коэффициент корреляции связи $E_{\delta j}^* = f(C_j)$ в этом случае равен 0,96, а среднее квадратическое отклонение опытных точек от линии регрессии равно $\pm 15044,3 \text{ кгс/см}^2$, что составляет $\pm 5 \%$. При этом максимальное отклонение отдельных опытных точек от линии регрессии составило $-8,9 \%$ и $+10,6 \%$.

Из уравнения (9) следует, что значения коэффициентов равны, $a = 19828,65$ и $b = 5,5 \cdot 10^{-4}$.

Экспериментальная апробация разработанного метода

Для подтверждения точности определения модуля упругости бетона разработанным ультразвуковым методом по формулам (1) - (7), выполнены дополнительные исследования трёх контрольных бетонных образцов – цилиндров диаметром 20 см и длиной 80 см при полном их водонасыщении в возрасте 28 суток после изготовления. Результаты комплексных исследований образцов – цилиндров по определению модуля упругости бетона выше указанного состава (цемент-1; песок-2,1; щебень-5,35; содержание цемента 280 кг/м^3) приведены в таблице 2.

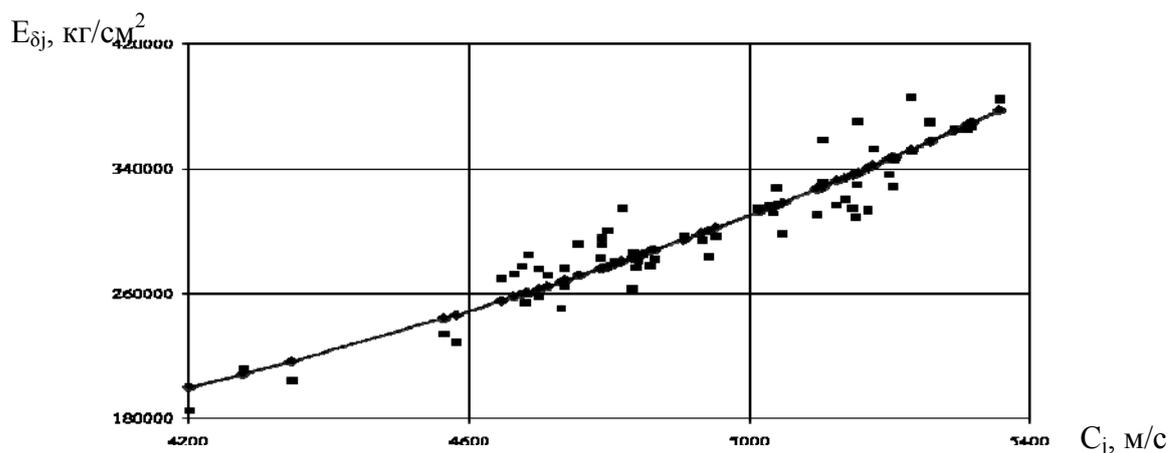


Рисунок 1 - График тарировочной связи «скорость ультразвука-модуль упругости бетона» (бетон по прочности на сжатие класса В 22,5; состав: цемент-1; песок-2,1; щебень-5,35; содержание цемента 280 кг/м^3)

Таблица 2 - Результаты исследований водонасыщенных контрольных образцов – цилиндров по определению модуля упругости бетона разработанным ультразвуковым методом в сравнении с известными способами [1, 3]

№ обр азца	мас са обр	азца СКВО	зно м	щ це н е) бето	Модуль упругости бетона
------------------	------------------	--------------	----------	----------------------------	-------------------------

				при испытании образцов на прессе [1]	по скорости УЗК разработанным методом на основе формул (1)-(7)*	погрешность, %	по скорости УЗК по методу А.М. Филонидова [3] на основе формулы (8)**	погрешность, %
1	2,43	5600	5,0	329656	315811	4,2	431440	-30,9
2	2,43	5590	5,1	324230	308018	5,0	429073	-32,3
3	2,42	5560	5,3	306844	292116	4,8	422052	-37,5
Средние значения	2,427	5583	5,13	320243	305315	4,7	427522	-33,6
* с учётом влажности бетона; ** без учёта влажности бетона								

По результатам исследований водонасыщенных контрольных бетонных образцов-цилиндров (табл. 1) установлено: модуль упругости бетона по стандартному методу [1] составляет 306844-329656 кгс/см², по разработанному методу - 292116-306844 кгс/см² и по методу А.М. Филонидова [3] – 422052-431440 кгс/см².

Погрешность при ультразвуковом контроле модуля упругости бетона без учёта его влажности [1] составила в среднем -33,6 %.

Предложенный метод ультразвукового контроля модуля упругости бетона в конструкциях сооружений, работающих во влажной среде, имеет высокую точность и позволяет снизить погрешность измерений до ± 5 %.

Выводы

1. Стандартный способ определения модуля упругости бетона по ГОСТ 24452-80 [1] является разрушающим и трудоёмким. Главный недостаток этого способа заключается в том, что его можно применить только для контроля образцов бетона, но не в реальных конструкциях ГТС.

2. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан универсальный экспресс-метод ультразвукового контроля модуля упругости бетона в конструкциях сооружений, работающих во влажной среде.

3. Проведённые исследования позволяют рекомендовать разработанный метод ультразвукового контроля модуля упругости бетона гидротехнических сооружений для их диагностирования при строительстве, эксплуатации и реконструкции водохозяйственных объектов. Этот метод контроля, не требующий нарушения целостности конструкций, имеет достаточную для производственных условий точность и достоверность.

Литература

1. ГОСТ 24452-80 Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. М.: Изд. стандартов, 1980. – 12 с.
2. Почтовик Г.Я., Злочевский А.Б., Яковлев А.И. Методы и средства испытания строительных конструкций: Учебн. пособие для ВУЗов под ред. Ю.А. Нилендера. М.: «Высшая школа», 1973. – 158 с.
3. Филонидов А.М. Определение модуля упругости бетона в конструкциях и сооружениях // Известия ВУЗов, раздел «Строительство и архитектура». – 1973. - №7. – С. 176-179.
4. Алимов А.Г. Совершенствование теоретических основ ультразвукового диагностирования бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. – 2007. - №2. – С. 29-32.
5. Савич А.И., Коптев В.И., Никитин В.Н., Яценко З.Г. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. – М.: Недра, 1969.
6. Савич А.И., Яценко З.Г. Исследование упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами. – М.: Недра, 1979.
7. Подвальный А.М. Об оценке результатов коррозионных испытаний и марках бетона по морозостойкости.
8. ГОСТ 21616-91 Тензорезисторы. Общие технические условия. М.: Изд. стандартов, 1991. – 47 с.
9. Длин А.М. Математическая статистика в технике. – М.: Советская наука, 1958. – 466 с.