

УДК 691.32

Особенности и виды механических, физических и комплексных неразрушающих методов определения прочности бетона и анализ их применения

В.Д. Петухов, кандидат экономических наук, доцент кафедры Экономики,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,

С.В. Рябчиков, аспирант, ведущий инженер,

Федеральное государственное бюджетное учреждение

«Научно-исследовательский институт строительной физики

Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН),
г. Москва

В статье рассмотрены существующие неразрушающие методы, применяемые для определения и анализа прочности бетона и конструкций из него. Представлены результаты сравнительного анализа различных методов, проведенных авторами на различных объектах промышленного и гражданского строительства. Доказано эмпирическим путем с использованием комплексного подхода, что мнимая простота косвенных методов неразрушающего контроля (с использованием молотков Физделя, Кашкарова и других) усложняется построением и расчётом градуировочной зависимости и учетом влияния факторов, искажающих результат. Это вызывает большой разброс данных, снижающих эффективность исследования. Проведенный анализ показал, что оптимальным по большинству параметров является метод определения прочности бетона путем отрыва со скалыванием.

Обследование зданий и сооружений, прочность бетона, конструкции, неразрушающие методы контроля, косвенные неразрушающие методы, прямые (стандартные) неразрушающие методы, отрыв, отрыв со скалыванием, скалывание ребра, упругий отскок, тарировочные кривые, метод пластической деформации, ударный импульс, метод отрыва связи напряжения, оборудование для определения прочности бетона, неразрушающий контроль.

Various of Methods that could be used in non-destructive purpose for expecting and analysis of the strength of concrete and its subsequent application

V.D. Petukhov, PhD, Department of Economics,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,

S.V. Rabchicov, graduate, leading engineer,
Federal State budgetary organization Scientific research institute for construction physics of the Russian Architecture Academy and Building Sciences (NIISF RAASN),
Moscow

The article discusses the existing non-destructive methods for determining the strength of concrete. The results of a comparative analysis of various methods carried out by the authors at various objects of industrial and civil construction are presented. It is proved empirically using an integrated approach that the imaginary simplicity of indirect methods of non-destructive testing (using Fizdel, Kashkarov hammers and other measure equipment) is complicated by the construction and calculation of the calibration dependence and taking into account the influence of factors that distort the result. This causes a large spread of data that reduces the effectiveness of the study. The analysis showed that the optimal method for most parameters is the method of determining the strength of concrete by separation with chipping.

Buildings and structures inspection and analysis, concrete strength, structures, non-destructive testing methods, indirect non-destructive methods, direct (standard) non-destructive methods, pull-off, pull-off with spalling, rib spalling, rebound, calibration curves, plastic deformation method, shock impulse, pull-off method a stress connections, equipment for determining the strength of concrete, non-destructive testing.

В строительных нормативах и в практике строительных экспертов и технического надзора закреплён ряд методик, позволяющих определить прочность бетона. Под прочностью нами понимается способность противостоять внешнему воздействию. Определения прочности бетона на сжатие считается наиболее точным методом [1]. Для этого исследуемый образец подвергают воздействию до разрушения на гидравлическом прессе. Анализируются бетонные образцы Кубической формы с различной длиной ребра – от 100 мм до 300 мм (с шагом возможных размеров в 50 мм) [2], изготовленного на объекте из того же бетона, что и конструкция.

Если требуется проверка прочности бетона конструкции в существующем здании, то это производится согласно [1] путем выпиливания керна (цилиндра) диаметром $d=100,150,200, 250,300$ мм согласно [2], при условии, что высота $h \geq d$.

Развитие физики и радиоэлектроники позволило разработать и внедрить в исследовательскую практику (обследования зданий), так называемые **неразрушающие методы контроля** качества бетона.

Эти методы имеют ряд достоинств, из которых отметим:

- 1) Сохранение цельности контролируемой конструкции, т.е. при испытании не повреждают конструкции и тем самым не снижается его несущая способность;
- 2) Возможность многократного испытания образца или конструкции одновременно как в процессе ее строительства, так и в период эксплуатации. Этот факт, дает возможность получать более точные значения прочности бетона в процессе испытания, а также устанавливать закономерности изменения искомого показателя во времени;

3) Низкая трудоемкость, как следствие минимальные затраты времени для проведения испытания;

4) Возможность определять прочность в любой доступной точке.

Механический метод основан на определении механической характеристики, по которой вычисляют предел прочности бетона на сжатие.

Неразрушающие механические методы определения прочности бетона в соответствии с [3] делятся на 2 группы:

1 группа: Косвенные неразрушающие методы – определение прочности бетона по предварительно установленным градуировочным зависимостям, включают методы:

- упругий отскок;
- пластической деформации;
- ударного импульса.

2 группа: Прямые (стандартные) неразрушающие методы – предусматривают стандартные схемы испытаний и допускают применение известных градуировочных зависимостей без привязки и корректировки, включают методы:

- отрыва;
- отрыв со скалыванием;
- скалывание ребра.

Рассмотрим по отдельности каждый из 5 механических методов неразрушающего контроля прочности бетона:

1) Упругого отскока. Метод упругого отскока основан на связи прочности бетона со значением отскока бойка от поверхности бетона (или прижатого к ней ударника), то есть измеряют высоту упругого отскока бойка при постоянной величине кинетической энергии металлической пружины. Ударная твердость бетона связана с его прочностью; с повышением прочности возрастают ударная твердость и характеризующая ее высота упругого отскока. Прочность бетона определяют по тарировочным кривым. Кривые учитывают положение молотка при испытании, так как величина отскока будет в известной мере зависеть от его направления, поскольку на нее в определенной мере влияет сила тяжести (рис. 1).

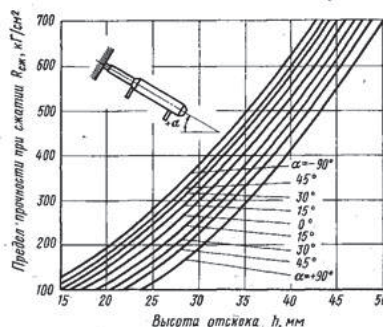


Рисунок 1 – Прибор – Склерометр (молоток Шмидта) «PROCEQ» (Швейцария, г. Шверценбах), реализующий механический метод неразрушающего контроля прочности бетона – метод упругого отскока.

Общий вид прибора (слева), тарировочные кривые для молотка Шмидта (справа)

Молоток (склерометр) Шмидта – разработан в 1948 году инженером Эрнстом О. Шмидтом, работавшим в компании Proceq SA (Швейцария).

2) Пластической деформации. Метод пластической деформации на связи прочности бетона с размерами отпечатка на бетоне конструкции (диаметра) или соотношения диаметра отпечатка на бетоне и стандартном металлическом образце при ударе индентора или вдавливании индентора в поверхность бетона, рисунок 2.



Рисунок 2 – Прибор – Молоток Физделя (шариковый молоток), реализующий механический метод неразрушающего контроля прочности бетона – метод пластической деформации. Общий вид прибора (слева), тарировочные кривые для молотка Кашкарова (справа)

Молоток Физделя (шариковый молоток) – разработан в 1940-е годы сотрудником «НИИМосстрой» И.А. Физделем (СССР). Ручной шариковый молоток изготавливается из инструментальной стали, с одной стороны его имеется сферическое гнездо, в котором завальцован стальной шарик диаметром 17.463 мм. Масса молотка 250 г.

Шариковый молоток Н.А. Физделя является практически первым прибором, который получил массовое применение на стройке. Однако точность измерения сравнительно низкая, поскольку на диаметр отпечатка влияет не только прочность бетона, но и сила удара, т.е. субъективный фактор.

Молоток Кашкарова – шариковый молоток разработан в 1950-е годы сотрудником «НИИМосстрой» К.П. Кашкаровым (СССР). При ударе эталонным молотком Кашкарова получают одновременно два отпечатка – на эталоне (стальной стержень) и бетоне. Рабочим органом молотка является шарик подшипника диаметром 15 мм. По среднему значению этих отношений при пяти ударах и тарировочной кривой определяют прочность бетона на сжатие. Приборы, основанные на одновременном получении отпечатков на бетоне и эталоне, дают большую точность, так как соотношение диаметров отпечатков на бетоне и эталоне не зависит от силы удара (рис. 3).

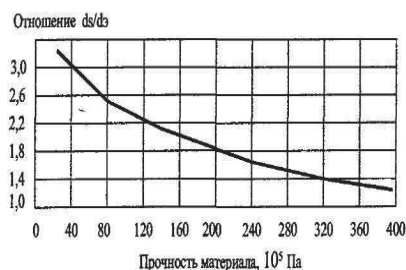


Рисунок 3 – Прибор – Молоток Кашкарова (Россия), реализующий механический метод неразрушающего контроля прочности бетона – метод пластической деформации. Общий вид прибора (слева), тарировочные кривые для молотка Кашкарова (справа)

3) Ударного импульса. Метод ударного импульса на связи прочности бетона с энергией удара и ее изменениями в момент соударения бойка с поверхностью бетона. Прибор для проведения исследования методом ударного импульса представлен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Прибор – ИПС-МГ4.03 СКБ «Стройприбор» (Россия, г. Челябинск), реализующий механический метод неразрушающего контроля прочности бетона – Метод ударного импульса. Общий вид прибора (слева), показания электронного блока (справа)

4) Отрыва Метод отрыва на связи напряжения, необходимого для местного разрушения бетона при отрыве приклеенного к нему металлического диска, равного усилию отрыва, деленному на площадь проекции поверхности отрыва бетона на плоскость диска (рис. 5).

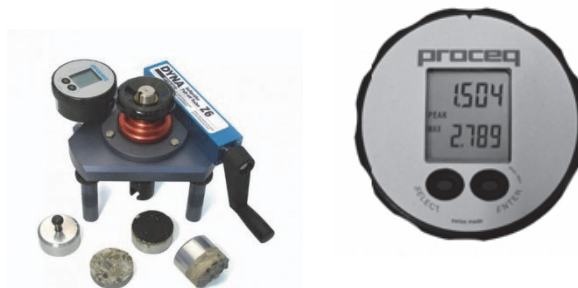


Рисунок 5 – Прибор – DYNA «PROCEQ» (Швейцария, г. Шверценбах), реализующий механический метод неразрушающего контроля прочности бетона – метод отрыва. Общий вид прибора (слева), показания электронного блока (справа)

Метод стальных дисков заключается в отрыве ранее приклеенных металлических дисков (за 6÷12 часов до начала проверки: зависит от клеящего состава).

Данный метод применяют в том случае, если:

- толщина защитного слоя бетона составляет менее 20 мм
- слишком тонкие бетонные конструкции;
- в железобетонной конструкции густоармированные стенки.

5) Отрыва со скалыванием. Метод отрыва со скалыванием на связи прочности бетона со значением усилия местного разрушения бетона при вырыве из него анкерного устройства (рисунок 6).



Рисунок 6 – Прибор – ПОС-МГ4.ОД СКБ «Стройприбор» (Россия, г. Челябинск), реализующий механический метод неразрушающего контроля прочности бетона – метод отрыв со скалыванием.

Общий вид прибора (слева), показания электронного блока (справа)

6) Скалывания ребра. Метод отрыва со скалыванием на связи прочности бетона со значением усилия местного разрушения бетона при вырыве из него анкерного устройства (рис. 7).



Рисунок 7 – Прибор – ОНИКС-1.СР НПП «Интерприбор» (Россия, г. Челябинск), реализующий механический метод неразрушающего контроля прочности бетона – метод скалывания ребра.

Общий вид прибора (слева), показания электронного блока (справа)

Последним прямым методом неразрушающего контроля является модификация метода отрыва – метод скалывания ребра. Основное отличие заключается в том, что прочность бетона определяют по усилию (Р), необходимому для скалывания участка конструкции, расположенному на внешнем ребре. Прочность бетона на сжатие при использовании метода скалывания ребра определяется по нормированной зависимости:

$$R=0.058 \cdot m \cdot (30P+P^2),$$

где m – коэффициент, учитывающий крупность заполнителя.

Для наглядности сравнения характеристики прямых методов контроля представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики прямых методов неразрушающего контроля

Преимущества	Метод		
	Отрыв	Отрыв со скалыванием	Скалывание ребра
Определение прочности бетонов классом более В 60	-	+	-
Работа при низких температурах воздуха	-	+	+
Быстрое время установки	-	+	+
Возможность установки на неровную поверхность (более 5 мм)	-	+	-
Возможность установки на плоский участок конструкции (без наличия ребер)	+	+	-
Отсутствие потребности в источнике электроснабжения для установки	+	-	+
Наличие в современных стандартах	-	+	+

Источник: [4]

По данным, приведенным в таблице, видно, что наибольшим числом пре-

имущество характеризуется – *метод отрыва со скалыванием*.

Однако, несмотря на возможность применения данного метода по указаниям норм без построения частной градуировочной зависимости, у многих специалистов возникает вопрос о точности получаемых результатов и соответствии их прочности бетона, определяемой методом испытания образцов.

Для исследования этого вопроса, а также сопоставления результатов измерений, полученных прямым методом с результатами измерений косвенными методами, проведен эксперимент, описанный в [5].

В лаборатории «Обследование и испытание зданий и сооружений» ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» были проведены исследования при использовании различных методов контроля. В качестве объекта исследования использован фрагмент бетонной стены, выпиленный алмазным инструментом. Габариты бетонного образца 2,0 x 1,0 x 0,3 м. Армирование выполнено двумя сетками арматуры диаметром 16 мм, расположенной с шагом 100 мм с величиной защитного слоя 15...60 мм.

В исследуемом образце применен тяжелый бетон на заполнителе из гранитного щебня фракции 20-40. Для определения прочности бетона использован базовый разрушающий метод контроля. Из образца с помощью установки алмазного сверления выбурены 11 кернов соответствующих требованиям [6]. По результатам испытания образцов на сжатие выявлено, что среднее значение прочности бетона составило 49,0 МПа. Распределение значений прочности подчиняется нормальному закону (рис. 4).

При этом прочность исследуемого бетона имеет высокую неоднородность с коэффициентом вариации 15,6% и СКО равным 7,6 МПа. Для неразрушающего контроля применены методы отрыва, отрыва со скалыванием, упругого отскока и ударного импульса. Для контроля использовались градуировочные зависимости, имеющиеся в паспортах приборов, или заложенные в них. Результаты измерений всеми методами представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерения прочности различными методами

№ п/п	Метод контроля	Количество измерений, n	Среднее значение прочности, R _m , МПа	Коэффициент вариации, V, %
1	Испытание на сжатие в прессе (ПГМ-1000 МГ 4)	29	49,0	15,6
2	Метод отрыва со скалыванием (ПОС-50 МГ 4)	6	51,1	4,8
3	Метод отрыва (DYNA)	3	49,5	-
4	Метод ударного импульса (Silver Schmidt)	30	68,4	7,8
5	Метод ударного импульса (ИПС-МГ 4)	7(105)	78,2	5,2
6	Метод упругого отскока (Beton Condrol)	30	67,8	7,27

По данным, представленным в таблице, можно сделать следующие выводы:

- среднее значение прочности, полученной испытанием на сжатие и пря-

мыми методами неразрушающего контроля, различается не более чем на 5%;

- по результатам шести испытаний методом отрыва со скалыванием разброс прочности характеризуется низким значением коэффициента вариации 4,8%;

- результаты, полученные всеми косвенными методами контроля, превышают прочность на 40-60%. Одним из факторов, приведших к данному превышению, является карбонизация бетона, глубина которой на исследуемой поверхности образца составила 7 мм.

Выводы

1. Мнимая простота и высокая производительность косвенных методов неразрушающего контроля теряется при выполнении требований построения градуировочной зависимости и учета (устранении) влияния факторов, искажающих результат. Без выполнения этих условий данные методы при обследовании конструкций можно применять только для качественной оценки прочности по принципу «больше – меньше».

2. Результаты измерений прочности базовым методом разрушающего контроля путем сжатия отбираемых образцов также могут сопровождаться большим разбросом, вызванным как неоднородностью бетона, так и другими факторами.

3. Учитывая повышенную трудоемкость разрушающего метода и подтвержденную достоверность результатов, получаемых прямыми методами неразрушающего контроля, при обследовании рекомендуется применять последние.

4. Среди прямых методов неразрушающего контроля оптимальным по большинству параметров является метод отрыва со скалыванием.

В общем случае неразрушающие механические методы определения прочности бетона являются косвенными неразрушающими методами определения прочности.

Прочность бетона в конструкциях определяют по экспериментально установленным градуировочным зависимостям, иными словами по таким показателям (величина отскока бойка, диаметр и глубина отпечатка на поверхности бетона, энергия удара и ее изменение при ударе об бетон, усилие отрыва диска от бетона, усилие вырыва анкера из бетона, усилие скалывания ребра бетонной конструкции) и их сопоставления с тарировочной кривой, выводятся прочностные характеристики бетона (R).

Физические методы основаны на измерении скорости распространения ультразвука в бетоне, зависящего от плотности и от прочностных характеристик бетона, или ослабления гамма-лучей, проходящих через испытываемую бетонную конструкцию (образец).

Согласно исследованиям [4], ультразвуковой метод определения прочности бетона-неразрушающий метод определения прочности бетона, основанный на зависимости косвенной характеристики (скорость и время распространения ультразвука) от прочности бетона. На рисунке 8 представлено исследование прочности бетона автором.

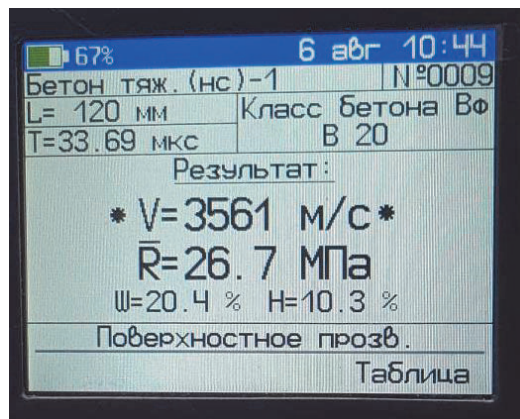


Рисунок 8 – Прибор – ПУЛЬСАР-2.2 НПП «Интерприбор» (Россия, г. Челябинск), реализующий механический метод неразрушающего контроля прочности бетона – ультразвуковой метод (УЗК). Общий вид прибора (слева), показания электронного блока (справа)

Ультразвуковой метод применяют для определения прочности бетона в установленном проектной документацией промежуточном и проектном (как правило, 28-суточном) возрасте и возрасте, превышающем проектный при обследовании конструкций.

При построении градуировочной зависимости по результатам параллельных испытаний ультразвуковым методом и методом отрыва со скалыванием, предварительно проводят ультразвуковые измерения и определяют участки с минимальным и максимальным косвенными показателями. Затем выбирают не менее 12 участков, включая участки, в которых значение косвенного показателя максимальное, минимальное и имеет промежуточные значения (рис. 9).

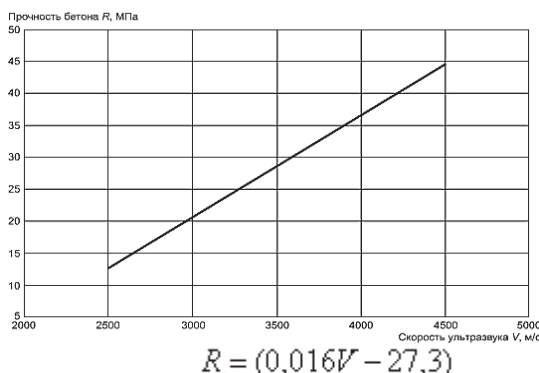


Рисунок 9 – Универсальная градуировочная зависимость, построенная по результатам испытаний конструкций из бетона проектных классов В7,5-В35 в возрасте 20-30 суток согласно [4]

По комплексному методу прочностные характеристики бетона установ-

ливают не по одной, а по двум или нескольким физико-механическим характеристикам, которые определяют одновременно на одних и тех же конструкциях. Приводим пример установления и оценки параметров градуировочной зависимости бетонов классов прочности В20-В25.

Прочность бетона классов В20-В25 контролируют в конструкции методом поверхностного прозвучивания. Для установления градуировочной зависимости между скоростью ультразвука и прочностью бетона в возрасте 28 сут выполнены параллельные испытания одних и тех же участков конструкций ультразвуковым методом и методом отрыва со скалыванием по [3]. Результаты испытаний приведены в графах 2, 3 таблицы 3.

Таблица 3 – Результаты измерения прочности прямым методом (отрыв со скалыванием) и косвенным (ультразвуковой)

Номер участка	Скорость ультразвука, м/с	Прочность, МПа			$ R_{\text{НН}} - R_{\text{НФ}} /S$		Примечание
		по результатам испытаний по ГОСТ 22690	по градуировочной зависимости		до отбраковки	после отбраковки	
			до отбраковки	после отбраковки			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	3245	20,8	22,9	23,3	0,61	0,73	-
2	2470	13,6	11,6	11,3	0,58	0,68	-
3	3095	22,6	20,7	21,0	0,56	0,48	-
4	2870	15,6	17,4	17,5	0,54	0,55	-
5	4320	37,3	38,5	40,0	0,34	0,78	-
6	3615	33,5	28,2	29,0	1,55	1,31	-
7	2655	14,2	14,3	14,2	0,03	0,01	-
8	3780	30,7	30,6	31,6	0,02	0,26	-
9	3490	21,8	26,4	27,1	1,36	1,56	-
10	3840	38,1	31,5	32,5	1,94	1,64	-
11	3400	30,3	25,1	25,7	1,53	1,35	-
12	3255	22,5	23,0	23,5	0,15	0,28	-
13	3940	35,8	32,9	34,1	0,84	0,51	-
14	4070	33,1	34,8	36,1	0,51	0,88	-
15	3340	23,2	24,2	24,8	0,31	0,46	-
16	2940	15,6	18,4	18,6	0,84	0,87	-
17	3130	17,5	21,2	21,5	1,09	1,18	-
18	3305	29,7	23,7	24,2	1,76	1,61	-
19	3765	20,1	30,4	-	3,03	-	Отбраковано

Для скорректированной градуировочной зависимости вида $R = 0,0155V - 27,0$ условие (Б.6) приложения Б выполняется на всех участках. Дальнейшую отбраковку проводить не требуется. Графики градуировочных зависимостей до и после корректировки приведены на рисунке 10.

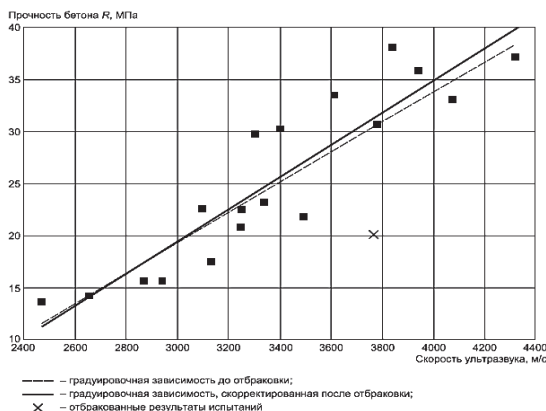


Рисунок 10 – Градуировочная зависимость

Про факторы, влияющие на ошибку измерения прочности без построения частных градуировочных зависимостей, написано много работ, в том числе приведенные в списке литературы [7, 8]. В монографии по неразрушающему контролю бетона представлены данные по максимальной погрешности измерений различными методами [3].

Вывод по проведенным в статье исследованиям сводится к применению комплексного метода определения прочности бетона (по физико-механическим характеристикам) основанного на использовании наиболее точного – прямого метода (отрыв со скалыванием) и косвенного (ультразвуковой) метода неразрушающего контроля, а также построении градуировочной зависимости по результатам параллельных испытаний.

Литература

1. ГОСТ 10180-2012 БЕТОНЫ. Методы определения прочности по контрольным образцам.
2. ГОСТ 22685-89 формы для изготовления контрольных образцов бетона. Технические условия.
3. ГОСТ 22690-2015 Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля.
4. ГОСТ 17624-2012 Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности.
5. Улыбин В., Федотов С.Д., Тарасова Д.С. Определение прочности бетона при обследовании зданий и сооружений // Журнал «Мир строительства и Недвижимости». Выпуск 45. Санкт-Петербург. 2012г.
6. ГОСТ 28570-2019 Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций.

7. Штенгель В.Г. О корректном применении НК в обследованиях железобетонных конструкций длительно эксплуатирующихся сооружений // В мире НК. 2009. № 3. С. 56-62.
8. Улыбин А.В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 4(22). С. 10-15.
9. Джонс Р., Фэкзоару И. Неразрушающие методы испытаний бетонов. Пер. с румынск. М., Стройиздат, 1974. 292 с.