

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ  
ЕВРОПЕЙСКИХ СТАНДАРТОВ  
В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА**

(г. Минск, БНТУ — 27-28.05.2014)

УДК 691.32.008.6

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА  
КОНСТРУКЦИЙ СЕГОДНЯ: ПРАКТИЧЕСКИЙ АСПЕКТ**

*СНЕЖКОВ Д.Ю., ЛЕОНОВИЧ С.Н.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

Особую роль в качестве основы производственно-технологического контроля приобретают оперативные неразрушающие методы определения прочностных показателей бетона: они могут использоваться как на ранних стадиях его твердения - при оценке распалубочной прочности и в процессе выдерживания, обеспечивая сплошной контроль строительной продукции, так и при выполнении мониторинга прочностных параметров бетона наиболее ответственных монолитных конструкций, до достижения ими проектных значений. Не менее важна роль неразрушающего контроля при обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений, особенно эксплуатируемых в условиях динамических нагрузок, а также при выполнении работ связанных с реконструкцией. Сильной стороной неразрушающих методов испытаний бетона является возможность их многократного применения даже на ограниченных участках поверхности испытываемой конструкции. Это позволяет получить достаточную репрезентативность выборки для корректного применения статистических методов обработки результа-

тов испытаний и, соответственно, - статистически обоснованную оценку класса бетона по прочности.

### ***1. Методы контроля***

Основная проблема неразрушающих испытаний бетона конструкций заключается в том, что измерительные процессы известных неразрушающих методов испытания прочности бетона [2, 3] не являются адекватными по напряженно-деформированному состоянию бетона в зоне контроля ни друг другу, ни процессу прессового испытания бетонного образца на одноосное сжатие по ГОСТ 10180-90 [1]. Проявляется это в том, что косвенные параметры неразрушающих методов испытаний в разной степени подвержены влиянию изменений физико-механических свойств контролируемого бетона. Это значит, что оценки прочности неразрушающими методами будут зависеть не только от фактической прочности бетона (определяемой прессовыми испытаниями образцов), но и от других его характеристик: модуля упругости, динамической вязкости, структурной неоднородности и др.

Вариации физико-механических свойств бетона оказывают влияние и на результаты метода прессовых испытаний. Но поскольку этот метод принят в качестве эталонного, то его результат рассматривается как «истинная» оценка прочности бетона, а все остальные методы должны на нее «равняться». Соответствие их результатов данным прессовых испытаний достигается подбором градуировочных зависимостей под конкретные условия испытаний. Используемый термин «подбор» не случаен. Практика неразрушающих испытаний бетона показывает, что даже строгое следование указанным в нормативах методикам построения градуировочных зависимостей совершенно не гарантирует адекватности результата неразрушающего определения прочности бетона в конструкциях, данным прессовых испытаний изъятых из массива образцов [5, 6]. В частности, оценки прочности бетонного массива ультразвуковым импульсным методом получают, как правило, несколько заниженными, методом упругого отскока (молоток Шмидта) – завышенными.

На рис. 1 приведены данные совместных испытаний монолитных колонн методом упругого отскока и ультразвуковым импульсным методом на объекте монолитного строительства в г. Минске в 2013 г.

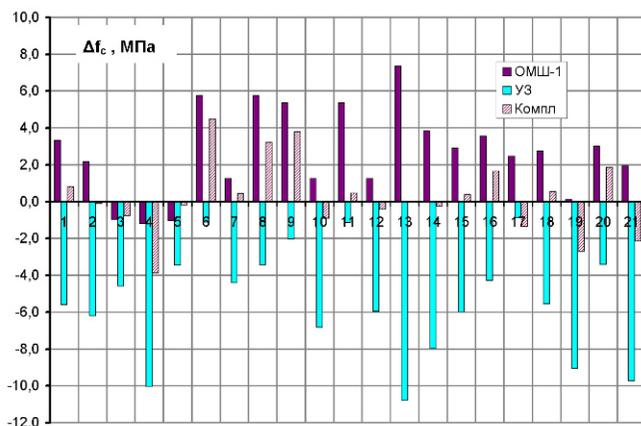


Рис. 1. Отклонения оценок неразрушающими методами прочности бетона монолитных колонн квадратного 400×400 мм сечения от оценок методом отрыва со скалыванием; (бетон проектного класса  $C^{35}/_{45}$ , срок твердения – 30...35 суток)

Среднее значение прочности бетона  $f_{cm,КОЛ}$  группы из 21 колонны по данным метода отрыва со скалыванием составило 44,7 МПа. Коэффициенте вариации оценок прочности методом упругого отскока составил  $V_I = 8,10\%$ , для ультразвукового метода  $V_{us} = 7,54\%$ . Заметно смещены от нуля средние значения отклонений  $\Delta f_c$  каждого из неразрушающих методов для всей группы колонн: оценки метода упругого отскока несколько завышены, а ультразвукового метода – занижены. Типичное отношение оценок прочности методом упругого отскока и ультразвуковым методом находится в пределах 1,06..1,18, что является признаком несоответствия использованных градуировочных зависимостей фактическим соотношениям прочности бетона и косвенных параметров неразрушающих методов.

Причины вариации прочности лабораторных бетонных испытательных образцов и бетона конструкции, как правило, не совпадают. Поскольку «естественной» вариации прочности лабораторных образцов (коэффициент вариации прочности не выходит за пределы 13..17%) недостаточно для надежного установления градуировочной зависимости, создается «искусственная» путем вариации водоцементного отношения бетонной смеси. Для прочности бетона конструкции спектр вариабельных факторов значительно шире, это и технологические факторы, обусловленные транспортированием бетонной смеси, режимом ее укладки и уплотнения, а также факто-

ры сопутствующие структурообразованию бетона и связанные с процессами усадки твердеющего бетона, условиями его тепло- и влагообмена с окружающим воздухом. Не говоря уж о случаях явного или предполагаемого нарушения технологии выполнения бетонных работ. При соблюдении технологических режимов бетонных работ острой потребности в контроле прочности бетона в конструкциях, как правило, не возникает. А в «нештатных» случаях приходится пользоваться неадекватными ситуациями градуировочными зависимостями, поскольку смоделировать сложившуюся «нештатную» ситуацию с бетоном в лабораторных условиях градуировочных испытаний не представляется возможным. Поэтому градуировочную зависимость для бетона конструкции приходится корректировать по данным экспертных методов, уточняя ее параметры по мере накопления статистики испытаний.

## **2. Масштабный фактор**

К указанным причинам несоответствия градуировочных зависимостей следует добавить еще одну, - отличие процессов неразрушающих методов в крупноразмерном элементе конструкции и в малоразмерном образце, используемом в градуировочных испытаниях.

Типичным в практике ультразвукового контроля прочности бетона [2] является использование метода поверхностного прозвучивания и акустических преобразователей с сухим точечным контактом. Распространенные приборы тип УК1401 и серии «Пульсар» конструктивно адаптированы именно к такому методу испытаний. Для построения градуировочной зависимости измерение скорости распространения ультразвукового (УЗ) импульса в образце-кубе производят устанавливая излучающий и приемный преобразователи на диагонали в плоскости одной грани. Для куба размерами 100×100×100 мм длина диагонали составляет 141 мм. При измерительной базе прибора «Пульсар-1.1» в 120 мм точки акустического контакта преобразователей будут отстоять от вершин куба всего лишь на ~1 см, что приводит к значительному отличию волновой картины образца от картины формирующейся в элементе конструкции, имеющего размеры на порядок большие. При использовании прибора УК1401 (измерительная база – 150 мм) приходится использовать кубы 150×150×150 мм. Даже в этом случае расстояние от точек акустического контакта до граней образца составляет ~17 мм, что меньше половины длины волны импульса. Близость границ об-

разца к точкам возбуждения и приема акустического импульса проявит себя эффектами интерференции прямой и отраженных волн, что выразится в изменении амплитуды и длительности акустического импульса в точках возбуждения и приема. В итоге, эти изменения импульса могут проявить себя уменьшением отсчета времени распространения, а это, соответственно, исказит градуировочную зависимость.

С использованием конечно-элементного моделирования нами была выполнена оценка коэффициента ослабления импульса продольной волны по мере его распространения вдоль оси образца-цилиндра с физико-механическими параметрами соответствующими тяжелому бетону класса по прочности  $C^{25}/_{30}$ , возбуждение импульса производится точечно в центре торца образца-цилиндра. Теоретически энергия акустического импульса продольной волны должна уменьшаться прямо пропорционально квадрату расстояния  $Z$  пройденного волной, а амплитуда деформации (смещения узлов модели)  $\xi$  - уменьшаться прямо пропорционально первой степени пройденного волной расстояния  $Z$  в соответствии с выражением

$$\xi = \xi_0 \cdot \frac{Z_0}{Z}, \quad (1)$$

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

На рисунке 2 приведены временные диаграммы нормированных значений упругих деформаций  $\xi(t)$  образца в точках, расположенных на его оси по направлению распространения волны. Цифры у вершин импульсов соответствуют расстоянию  $Z$  (в сантиметрах) от точки возбуждения импульса. Параметры материала модели:  $E = 20$  ГПа;  $\nu = 0,2$ ;  $\rho = 2400$  кг·м<sup>-3</sup>. Временные параметры силового воздействия также выбраны из условия приближения к реальному воздействию создаваемому точечным протектором электроакустического преобразователя.

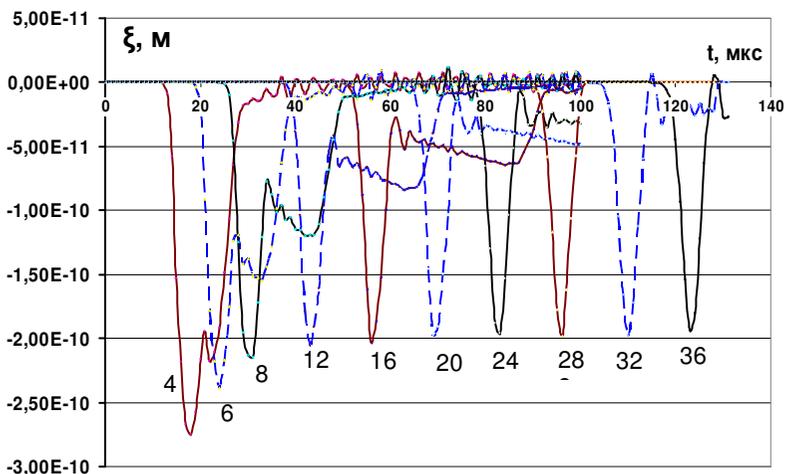


Рис. 2. Временные диаграммы волнового импульса продольной волны в протяженном цилиндрическом образце

В качестве упрощенного варианта описания импульса возбуждения использован первый полупериод функции вида

$$P(t) = P_{\max} \cdot [1 - \exp(-0.5t)] \cdot \sin \frac{\pi \cdot t}{T}, \quad (2)$$

для  $0 \leq t \leq T$ , где  $T$  – продолжительность воздействия,  $T = 7 \cdot 10^{-6}$  с. Амплитуда воздействия  $P_{\max}$  принималась равной 1 Н. Нормирование выполнялось в соответствии с выражением:

$$\xi_{\text{Norm}} = \xi \cdot Z / Z_0, \quad (3)$$

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

По диаграммам рис.2 видно, что на расстоянии  $Z < 8$  см от излучателя амплитуда волнового импульса заметно превышает уровень установившейся волны, соответствующий процессу распространения волны в квазибесконечной среде. Форма импульса также претерпевает изменения. Аналогично, в соответствии с принципом обратимости, амплитуда импульса продольной волны в точке приема вблизи границы образца, также будет увеличена за счет интерференции ее с отраженной волной от границы. В итоге, общее затухание импульса от точки возбуждения до точки приема может сни-

зиться в 4 раза, а длительность импульса – удвоится. В этом случае принципиальное значение приобретает алгоритм регистрации времени распространения импульса.

Для метода упругого отскока [3] знак поправки отрицательный, что можно объяснить уменьшением приведенного значения модуля упругости бетона в точке индентирования. Возможной причиной этого может являться увеличение диссипации энергии импульса упругой деформации на переходах *бетонный образец – плита прессы – элементы подвески плиты*, за счет их динамического вовлечения в силовое взаимодействие при инденторных испытаниях бетонных образцов\*. Следует заметить, что увеличение гибкости и подвижности связанной системы *бетонный образец – плита прессы – элементы подвески плиты* приведет к увеличению времени  $t_{ind}$  ударного взаимодействия индентора прибора с бетонным образцом,

$$\int_0^{t_{ind}} F_{ind}(t) \cdot dt = M \cdot V_{ind} \quad (4)$$

где  $M$  – масса индентора (бойка);  $V_{ind}$  – предупредная скорость индентора.

Следствием увеличения времени удара явится уменьшение амплитудного значения силы ударного взаимодействия  $F_{ind}$  и, соответственно, - уменьшение объема пластической деформации в точке испытаний, и рост индекса отскока. Таким образом, при инденторных испытаниях малоразмерных бетонных образцов зажатых между плитами испытательного прессы, можно выделить два физических процесса, имеющих противоположное влияние на индекс отскока. Какой из процессов имеет превалирующее значение можно выяснить, сопоставив данные измерения времени индентирования образцов и натуральных конструктивных элементов.

### **3. Комбинирование методов контроля**

Повысить надежность оценки прочностных параметров бетона возможно на основе комбинирования методов, объединяя несколько - обычно два физически разных метода – обладающих свойством *комплементарности* [8, 10]. В Евростандарте DIN EN 13791-2009 и

---

\* По ГОСТ 22690 и СТБ 2264-2012 испытания образцов бетона при установлении градуировочной зависимости производят зажав испытываемые образцы между плитами прессы с нагрузкой порядка 3 МПа.

СТБ 13791-2012 [4] разработчиками предусмотрена лишь ссылка на так называемые национальные предписания и специальную литературу по вопросу комбинирования методов испытаний, конкретной же методики комбинирования неразрушающих методов в этом документе нет. Поэтому, определенный интерес может представлять опыт практического использования авторами комбинированного метода [5, 6], включающего в себя метод упругого отскока и ультразвуковой импульсный метод. Об эффективности комбинированного метода могут дать представление результаты испытаний монолитных конструкций находившихся в замороженном состоянии и испытаний после оттаивания. Напомним, что из-за образования льда в структуре бетона действующими нормативами [2, 3] предписан ряд ограничений на использования неразрушающих методов испытаний бетона. На рис. 3 приведены диаграммы испытаний прочности бетона колонн находившихся на момент испытаний в замороженном состоянии более 5 суток Температура бетона на момент испытаний составляла  $-8^{\circ}\text{C}$ . До замораживания твердение бетона обеспечивалось применением электропрогрева в течение полутора суток сразу после укладки бетонной смеси, с последующим выдерживанием без снятия опалубки. Характерным для замороженного бетона явилась смена знаков поправок для неразрушающих методов испытаний практически по всем испытанным колоннам: ультразвуковой метод стал давать завышенные оценки, а метод упругого отскока – заниженные. Кроме смены знака отклонений оценок прочности значительно увеличились и сами отклонения, если для конструкций твердевших и испытанных в нормальных условиях отклонения оценок прочности (в среднем) находились в пределах 3,5..4,5 МПа, то для замороженного бетона этот показатель возрос до 8..13 МПа. Характерным явилось и отрицательное значение коэффициента взаимной корреляции оценок прочности молотком Шмидта и ультразвуковым методом:  $r_{\text{Sh,us}} = -0,24$ .

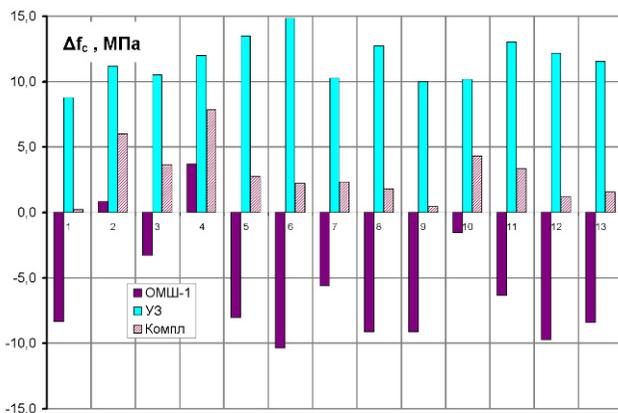


Рис. 3 Отклонения оценок неразрушающими методами прочности бетона монолитных колонн от оценок методом отрыва со скалыванием; (бетон проектного класса  $C^{35}/45$ , возраст бетона – 11...14 суток после электропрогрева и замораживания, температура бетона на момент испытаний - 8°C)

Приведенные результаты хорошо согласуются с представлениями о физике процессов использованных неразрушающих методов. При малых значениях влажности замена поровой влаги льдом приводит к увеличению динамического модуля упругости бетона, а это, в свою очередь, дает приращение скорости распространения ультразвукового импульса и, соответственно, - завышение оценки прочности. Снижение оценок метода упругого отскока также можно объяснить увеличением отношения модуля упругости бетона к прочности [6].

На рис. 4 приведены данные испытаний тех же колонн после оттаивания в течение 10 суток при средней температуре воздуха +5°C. Разброс оценок прочности каждым из методов заметно уменьшился, а коэффициент корреляции оценок прочности поменял знак на положительный и увеличился до значения 0,72. На рис. 5 приведены абсолютные значения оценок прочности бетона по каждой из колонн и средние значения прочности для всей группы из 13 колонн.

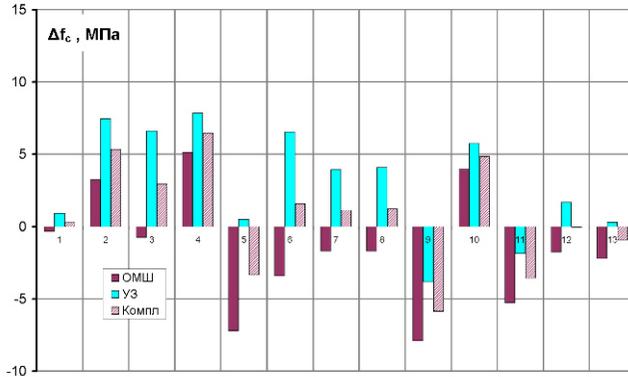
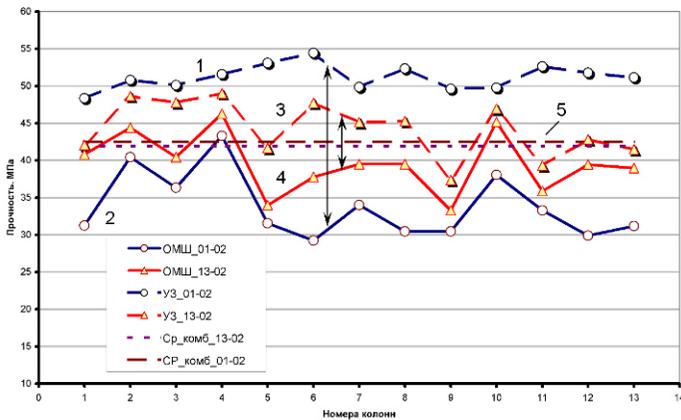


Рис. 4 Отклонения оценок неразрушающими методами прочности бетона монолитных колонн от оценок методом отрыва со скалыванием; (бетон проектного класса  $C^{35}_{/45}$ , срок твердения – 23...26 суток после электропрогрева, замораживания и оттаивания, температура бетона на момент испытаний + 5°C)



- 1 – оценки прочности замороженного бетона ультразвуковым методом;
- 2 – оценки прочности замороженного бетона методом упругого отскока;
- 3 – оценки прочности бетона после оттаивания ультразвуковым методом;
- 4 – оценки прочности бетона после оттаивания методом упругого отскока;
- 5 – средняя прочность бетона всей группы колонн комбинированным методом.

Рис. 5 Прочность бетона монолитных колонн по данным неразрушающих методов испытаний: проектный класс бетона по прочности  $C^{35}_{/45}$

На приведенных диаграммах можно отметить две особенности, свидетельствующие в пользу применения комбинированного метода неразрушающих испытаний бетона в конструкциях:

- показатели испытаний оттаявшего бетона (показаны треугольными маркерами) не выходят за пределы области ограниченной значениями этих же показателей (круглые маркеры) для замороженного бетона;

- средние значения прочности по данным комбинированного метода для всей группы колонн (показаны горизонтальными линиями на рис. 5) практически совпадают, - для замороженного бетона  $f_{cp} = 42,1$  МПа, для оттаявшего -  $f_{cp} = 45,5$  МПа.

#### ***4. Коррекция градуировочных зависимостей***

Как показано выше, систематическая погрешность неразрушающих методов испытаний, обусловленная неадекватностью их градуировочных зависимостей фактическим условиям применения, может достигать 15..20% и выше. Комбинированный метод испытаний тоже не лишен этого недостатка в полной мере, хотя в нем и происходит частичная компенсация этой погрешности, которая в итоге снижается до 3..7%, тем не менее, необходимость в снижении этого показателя остается.

Все действующие в настоящее время нормативы предлагают механизм коррекции градуировочных зависимостей. Общим во всех методиках является использование так называемых экспертных методов, в роли которых выступает либо метод прессовых испытаний отобранных из бетонного массива кернов, либо метод отрыва со скалыванием. Радикальное отличие методик коррекции градуировочных зависимостей по Евростандарту СТБ EN 13791-2012 и СТБ 2264-2012, ГОСТ 17624 состоит в иной процедуре обработки данных корректирующих испытаний. В результате чего, оценка прочности бетона по градуировочной зависимости Евростандарта [4] будет на величину  $k_1 \cdot s$  ниже, чем по градуировкам нормативов [2, 3]. Приведенные в [4, таб. 2] значения коэффициента  $k_1$  соответствуют 10 % квантилю массива данных градуировочных испытаний. Это, с одной стороны, якобы повышает надежность контроля, уменьшая вероятность завышения прочности, но, с другой, - способствует утрате доверия к неразрушающим испытаниям, поскольку их оценка в большинстве случаев будет ниже нормативного значения, даже для качественного бетона с заданными прочностными

показателями [7]. В этом аспекте, построение градуировочных зависимостей по методикам СТБ 2264 [3] и ГОСТ 17624 [2] делает оценки прочности неразрушающими методами и прямыми испытаниями образцов сопоставимыми, но, разумеется, степень их неопределенности будет разной.

Вопрос оценки степени неопределенности результата каждого из используемых методов весьма важен для практики неразрушающих испытаний бетона. Этот показатель характеризует надежность полученного соответствующим методом результата испытаний. С показателем неопределенности методов испытаний связаны и вопросы методики комбинирования методов испытаний: показатель неопределенности может быть использован в качестве весового коэффициента при усреднении результатов нескольких методов. Эти моменты обойдены вниманием и в Евростандартах и в действующих отечественных нормативах не случайно. Неопределенность оценки прочности тем или иным методом является, строго говоря, характеристикой не столько самого метода, сколько конкретных условий его применения. Поэтому практическое решение вопроса выбора параметров неопределенности оценок испытаний, по нашему мнению, лежит в плоскости уточнения и формализации физических процессов того или иного неразрушающего метода испытаний бетона.

### ***Заключение***

1. Систематическая составляющая в оценке характеристической прочности бетона неразрушающими методами испытаний обусловлена двумя факторами: неадекватностью напряженно-деформированного состояния бетона в зоне контроля при неразрушающих и прессовых испытаниях; и неполной адекватностью процессов неразрушающих испытаний в железобетонной конструкции и малоразмерных образцах бетона.

2. Повышение надежности в оценки характеристической прочности бетона возможно на основе комбинирования стандартизированных методов неразрушающих испытаний. Опыт практического использования комбинированного метода позволяет рекомендовать его в качестве основы для введения в систему нормирования неразрушающих испытаний бетона.

3. Методика построения и коррекции градуировочных зависимостей неразрушающих методов определения прочности бетона в конструкциях по СТБ EN 13791-2012 содержит спорные моменты.

Оборотной стороной данной методики является существенное занижение оценки нормативного показателя прочности бетона в конструкции, что неизбежно повлечет за собой отказ от использования неразрушающих методов в практике строительства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-90. – Введ. 01.01.91. – М.: 1991. – 16 с.
2. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности: ГОСТ 17624-87. – Введ. 01.01.88. – М.: 1988. – 12 с
3. Испытание бетона. Неразрушающий контроль прочности: СТБ 2264-2012, Госстандарт, Минск, 2013. – 20 с.
4. Оценка прочности на сжатие конструкций и элементов сборного бетона в реальных условиях: СТБ EN 13791-2012. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2012.
5. Леонович С.Н., Исследование неравнопрочности бетона на объекте монолитного строительства комплексным неразрушающим методом / С.Н. Леонович, Д.Ю. Снежков // «Известия вузов. Строительство», № 8, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет.– 2009. — С. 108-115.
6. Снежков Д.Ю., Неразрушающий контроль бетона монолитных конструкций / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович // Строительная наука и техника, Мн., 2009, №4(25), - С. 76-84.
7. Снежков Д.Ю., Анализ методик неразрушающих испытаний бетона конструкций по действующим государственным стандартам и нормам Евросоюза / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович, А.В. Вознищик // Наука и техника – 2013, №2 – Минск: БНТУ., – С 33-39.