

8. Железобетон в XXI веке: состояние и перспективы развития бетона и железобетона в России / Госстрой России; НИИЖБ. – Москва: Готика, 2001. – 684 с.

9. Вавренюк, С.В. Эффективные защитные покрытия, модифицированные полимерами: дис. ... д-ра техн. Наук: 05.23.05 / С. В. Вавренюк. – Москва, 2006. – 241 с.

10. Зайцев, Г.Е. Новые составы и системы для защиты бетонных конструкций / Г.Е. Зайцев [и др.] / Проблемы долговечности зданий и сооружений в современном строительстве: материалы междунар. Конференции, Санкт-Петербург, 2007. – С. 344-347.

УДК 620.179.12

О «НАДЕЖНОСТИ» ГРАДУИРОВОЧНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ СКЛЕРОМЕТРИЧЕСКИХ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

СНЕЖКОВ Д. Ю., ВИТУШКО Т. В., ХАЛЕВО И. А.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

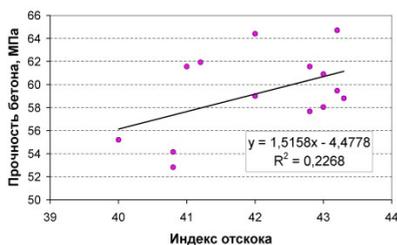
Практика использования неразрушающего контроля прочности бетона в натуральных условиях показывает, что результат таких испытаний далеко не всегда соответствует данным экспертных методов, в частности, – метода отрыва со скалыванием и метода испытаний отобранных образцов-кернов. Ошибка может достигать 25–40%. Основная причина этого заключается не в отсутствии у пользователя так называемых «надежных» градуировочных зависимостей, связывающих косвенный параметр метода испытаний с прочностью бетона, а в принципиальной невозможности получить такие зависимости, не учитывая множество влияющих факторов имеющих место на строительной площадке: вариации состава бетона, условий транспортирования бетонной смеси и её укладки, температурных и влажностных условий твердения бетона, степени карбонизации и др.. Зачастую процедуру построения градуировочной зависимости, не позволяющей выполнить требования этих же нормативов по критерию статистической надежности. Стабильнее качество бетонной

смеси и, соответственно, ниже значение коэффициента вариации прочности бетона образцов, тем труднее обеспечиваются условия статистической устойчивости построенной градуировочной зависимости того или иного косвенного метода испытаний.

На рис.1. приведены частные градуировочные зависимости методов упругого отскока и ударного импульса, построенные в соответствии с требованиями СТБ 2264 [3] и ГОСТ 22690–2015 [1]. Используются данные испытаний 15 образцов из бетона проектного класса С35/45 в возрасте 46 суток, твердевших в нормальных температурно-влажностных условиях. Данные прессовых испытаний подтвердили проектный класс бетона по прочности, коэффициент вариации прочности составил 6,2% при среднем значении прочности – 59,3 МПа.

В таблице 1 приведены основные параметры градуировочных зависимостей

а)



б)

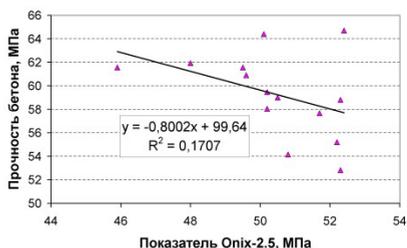


Рис. 1. Градуировочные зависимости:

а – метода упругого отскока; б – метода ударного импульса

Таблица 1

Параметры градуировочных зависимостей

Метод, прибор	a_1	s_{a1}	a_0	s_{a0}	S_t	r^2	r	F
Упр.отск., ОМШ-1	1,52	0,84	-4,42	35	3,4	0,23	0,48	3,22
Ударн. импульса, Оникс-2.5	-0,80	0,53	99,3	26,8	3,5	0,17	-0,41	2,26

a_1, a_0 – коэффициенты градуировочной зависимости вида $f_{c,H} = a_1 \cdot H + a_0$;

$f_{c,H}$ – прочность бетона по результатам косвенного метода испытаний;

s_{a1}, s_{a0} – среднее квадратическое отклонение коэффициентов a_1, a_0 , соответственно;

H – косвенный параметр;

r – коэффициент корреляции оценок прочности по результатам прессовых испытаний и косвенного метода с данной градуировочной зависимостью.

Остаточное среднее квадратическое отклонение S_t для линейной зависимости рассчитывается по формуле

$$S_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{c,i} - f_{c,i,H})^2}{n-2}}, \quad (1)$$

где $f_{c,i}$ – прочность бетона по данным прессовых испытаний;
 $f_{c,i,H}$ – прочность бетона по градуировочной зависимости данного косвенного метода испытаний;

При средней прочности образцов $f_{cm} = 59,3$ МПа, по условию

$$\frac{|f_{c,i,H} - f_{ci}|}{S_t} \leq 2, \quad (2)$$

полученные данные не потребовали коррекции. По условию

$$\frac{S_t}{f_{c,m}} \leq 0,15, \quad (3)$$

зависимости удовлетворяют требованиям п.6.1.6 ГОСТ 22690 [1] и п.6.15 СТБ 2264 [3]. В то же время по коэффициенту корреляции r ни одна из зависимостей не удовлетворяет требованиям ГОСТ 22690 ($r \geq 0,7$). Соответственно, указанные зависимости не являются значимыми и по критерию Фишера. Это значит, что полученные градуировочные зависимости нельзя считать «надежными», хотя построены в полном соответствии с требованиями действующих нормативов. Заметим, что коэффициент a_1 для зависимости метода ударного импульса получился отрицательным, что противоречит физическому принципу метода. Тем не менее, в отличие от ГОСТ 22690 [1] стандарт СТБ 2264 [3] разрешает использование полученных зависимостей для определения прочности бетона в конструкциях.

Одним из путей повышения точности оценки прочности бетона неразрушающими методами является введение в градуировочные зависимости дополнительных параметров, характеризующие указанные выше факторы погрешности, например, влажность бетона. В то же время ввести количественную оценку качества уплотнения бетона или вариации его состава в условиях строительной площадки затруднительно. Но поскольку вариация качества уплотнения

бетона и его состава проявит себя в изменении соотношения между параметрами упругости и прочности, то можно предположить, что методы, имеющие разную чувствительность к параметрам упругости и прочности бетона, дадут разные оценки прочности. Рассматривая косвенный параметр H_i каждого из объединяемых неразрушающих методов, как функцию F_i нескольких параметров бетона, например, – прочности f_c^* , модуля упругости E_c^* и влажности W , можем записать систему двух уравнений с соответствующим количеством неизвестных f_c и E_c .

$$\begin{aligned} H_1 &= F_1(f_c^*, E_c^*, W); \\ H_2 &= F_2(f_c^*, E_c^*, W). \end{aligned} \quad (4)$$

Систему уравнений (2) для двух методов испытаний можно преобразовать в следующую форму

$$\begin{aligned} f_c^* &= \Psi(H_1, H_2, W); \\ E_c^* &= \Omega(H_1, H_2, W). \end{aligned} \quad (5)$$

Каждое уравнение полученной системы представляет собой трехпараметровую градуировочную зависимость для расчета прочности f_c^* и модуля упругости E_c^* бетона. Таким образом, объединение двух физически различающихся методов испытаний теоретически позволит не только повысить точность оценки прочности бетона, но и улучшить информативность – дополнительно получить оценку его упругости.

Присутствие в уравнениях (1) и (2) параметра влажности W , на первый взгляд, не является оправданным с физической точки зрения, поскольку его размерность не координируется с размерностью механического напряжения. В то же время, присутствие свободной воды в пористой структуре цементного камня (и бетона в целом) проявляет себя изменением динамической вязкости бетона, которая является третьей характеристикой бетона, отражающей его реакцию на динамическое механическое воздействие индентора, наряду с прочностью и упругостью. Введение параметра влажности частично компенсирует влияние динамической вязкости бетона на косвенные параметры индентирования - H_1 и H_2 и, тем самым, «приближает»

по своей реологической модели динамический процесс индентирования к квазистатическому процессу прессовых испытаний.

Для экспериментальной проверки данной гипотезы была выполнена серия испытаний 20 образцов-кубов бетона проектного класса по прочности С30/37. Использовались два косвенных неразрушающих метода – метод упругого отскока, метод ударного импульса, и метод испытания образцов по ГОСТ 10180. Дополнительно измерялись масса образцов. Влажность бетона W контролировалась диэлектрически методом по ГОСТ 21718-84 (прибор МГ-4Б). По приведенным данным выполнено построение стандартных – по СТБ 2264 – линейных градуировочных зависимостей, и экспериментальных 2-3-х параметровых градуировочных зависимостей. В таблице 3 приведены основные параметры зависимостей.

Введение в зависимости параметра влажности (зависимости №3 и №4) подтвердило справедливость сформулированной выше гипотезы: остаточное среднее квадратическое отклонение S_t уменьшилось на 10%..16%, а коэффициент корреляции для обеих зависимостей превысил минимальное пороговое значение 0,7 (по ГОСТ 22690-2015).

Таблица 3

Параметры градуировочных зависимостей

№	Градуировочная зависимость	S_t	r^2	r	F
1	$f_c^* = 1,08 \cdot I + 3,8$	4,24	0,32	0,57	8,55
2	$f_c^* = 0,76 \cdot f_{c,оник} + 15,8$	3,95	0,41	0,62	12,6
3	$f_c^* = 0,55 \cdot I + 4,81 \cdot W + 3,1$	3,76	0,49	0,71	8,4
4	$f_c^* = 0,46 \cdot f_{c,оник} + 4,18 \cdot W + 9,3$	3,60	0,54	0,73	9,96
5	$f_c^* = 0,561 \cdot f_{c,оник} + 0,560 \cdot I + 3,06$	3,86	0,47	0,69	6,7
6	$f_c^* = 0,384 \cdot f_{c,оник} + 0,324 \cdot I + 3,64 \cdot W + 2,77$	3,63	0,55	0,74	7,5

где r^2 – коэффициент детерминации; r – коэффициент корреляции;

I – индекс отскока; W – влажность бетона в %;

f_c^* – расчетная прочность бетона, по данным косвенного метода, МПа;

$f_{c,оник}$ – косвенный показатель прочности по прибору «Оникс-2.5» МПа;

S_t – остаточное среднее квадратическое отклонение градуировочной зависимости, МПа.

Объединение данных молотка Шмидта и прибора метода ударного импульса «Оникс» (см. зависимость № 5) несколько улучшило показатели градуировки, но уступило по этим же показателям зависимостям № 3 и № 4. В то же время, объединение данных этих двух методов с показателем влажности позволило получить максимальное значение коэффициента корреляции – 0,74 (см. зависимость № 6). Характерным явилось то, что стандартные зависимости (№ 1 и № 2) не удовлетворяют требованиям ГОСТ 22690–2015 по показателю коэффициента корреляции r и не могут быть использованы для контроля бетона. В то же время, все полученные зависимости оказались значимыми по критерию Фишера.

Разумеется, ожидать высокой эффективности и универсальности от объединения двух близких по физике измерительных процессов склерометрических методов не следует. Лучшую перспективу могут представлять собой метод динамического индентирования [4], а также ультразвуковой метод прохождения [6], которые обладая большей селективностью к параметрам упругости и прочности бетона, чем рассмотренная выше пара методов, потенциально смогут обеспечить лучшие метрологические показатели контроля бетона.

Отдельным является вопрос влияния неоднородности бетона по физико-механическим параметрам на результаты испытаний склерометрическими неразрушающими методами. В первую очередь это касается ситуации, когда показатели прочности и упругости поверхностного слоя бетона отличаются от показателей внутренних областей массива, например, при высушивании бетона в случае раннего распалубливания. При контроле конструкций, находившихся в длительной эксплуатации определяющим может оказаться эффект карбонизации. В этом случае параметры упругости и прочности могут заметно превышать их средние значения для массива. Актуальным этот вопрос является и при контроле бетонных изделий с упрочненным поверхностным слоем. В этом случае эффективным является объединение методов испытаний, использующих различный объем вовлеченного в испытательный процесс бетона [2, 5].

На рис. 2 приведены данные испытания бетонных полов, выполненных с упрочнением верхнего слоя механическим втиранием упрочняющего компонента. Бетонное основание пола (толщина ~5–7 см) выполнено из сталефибробетона проектного класса по прочности С25/30. Упрочнению подвергался верхний слой бетона

толщиной 3–5 мм. По данным ультразвуковых испытаний прочность бетонного массива соответствует значениям 34–45 МПа. Оценки прочности бетона склерометрическими методами испытаний различаются более чем в два раза, причем показания склерометра ОМШ-1, имеющего большую энергию удара, ближе к данным ультразвукового метода, но имеют значительный разброс – от 29 до 52 МПа, что, вероятно, связано с различием в толщине упрочненного слоя выбранных зон контроля бетонного. Оценки ударно-импульсного метода (ИПС-МГ4) достаточно ровные и соответствуют проектной прочности для упрочненного слоя – 62–69 МПа.

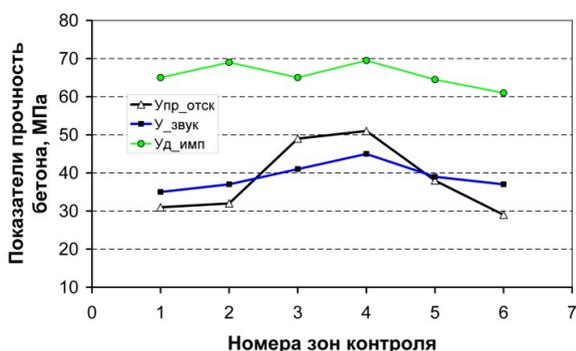


Рис. 2. Распределение оценок прочности бетонной плиты с упрочненным верхним слоем по данным неразрушающих методов испытаний

Такая картина распределения оценок прочности бетона для разных методов однозначно говорит о том, что в рассматриваемом случае ударно-импульсный метод, реализуемый прибором ИПС-МГ4, «принимает во внимание» прочность (твердость) верхнего упрочненного слоя. ОМШ-1, имеющий значительно бóльшую энергию удара, по сути, «проламывает» тонкий верхний твердый слой, за счет чего его оценка прочности снижается и приближается к значению прочности бетонной стяжки. Приведенные факты указывают на то, что оценка состояния бетона в конструкции каким-либо одним неразрушающим методом, без учета условий применения и «физики» процесса измерения не может быть объективной и достоверной.

Заключение. Для исследованных бетонов классов по прочности С30/37, С35/45 стандартные градуировочные зависимости методов упругого отскока и ударного импульса не смогли удовлетворить требования ГОСТ 22690 по показателю коэффициента корреляции.

Двухпараметровые градуировочные зависимости, включающие влажность бетона в качестве дополнительного параметра, позволили для всех экспериментальных серий образцов снизить остаточное среднее квадратическое отклонение градуировочной зависимости методов упругого отскока и ударного импульса на 10–16%, и устойчиво обеспечить минимально допустимое значение коэффициента корреляции $r = 0,7$ для исследованных составов бетона.

Разработанная методика построения двух- и трехпараметровых градуировочных зависимостей может быть рекомендована для включения в действующие нормативы, регламентирующие определение прочности бетона конструкций в построечных условиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля: ГОСТ 22690-2015. – М.: 2014. – 23 с.
2. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон – М.: «Мир», 1989. – 509 с.
3. Испытания бетона. Неразрушающий контроль прочности: СТБ 2264-2012 – Введ. 01.01.2013. – Минск: Госстандарт, 2013. - 20 с.
4. Снежков, Д.Ю. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович - Минск: БНТУ, 2016. - 330 с.
5. Способ определения прочности бетона в конструкциях методом неразрушающего контроля: пат. № 20585 Респ. Беларусь, МПК G 01 N 33/38/ Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович; заявитель БНТУ (BY). - № а 20130687; заявл. 29.05.2013; опубл 09.08.2016 // Афiційны бюл./ Нац. центр iнтелектуал. уласнасцi. – 2016.- №6 (113). - С.111-112.
6. Pucinotti, R. The use of multiple combined non destructive testing in the concrete strenght assessent: applications on laboratory specimens / R. Pucinotti // [Electronic resource], 2003. - Mode of access: http://www.ndt.net/article/hsndtct2007/files/Pucinitti_Crisci_etat.pdf. - Date of access: 02.02.2016