

## Градуировочные зависимости многопараметрового неразрушающего метода контроля прочности бетона

Халево И. А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Снежков Д.Ю.  
Белорусский национальный технический университет

Практика использования неразрушающего контроля прочности бетона в натуральных условиях показывает, что результат таких испытаний далеко не всегда соответствует данным экспертных методов, в частности, - метода упругого отскока 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: вариации состава бетона, условий транспортирования бетонной смеси и её укладки, температурных и влажностных условий твердения бетона, степени карбонизации и др.. Зачастую, даже строгое выполнение требований стандартов, регламентирующих процедуру построение градуировочной зависимости не позволяет выполнить требования этих же нормативов по критерию статистической надежности. При этом закономерным является следующее обстоятельство: чем стабильнее качество бетонной смеси и, соответственно, повторяемость показателя прочности бетона образцов, тем труднее удовлетворить требования статистической устойчивости построенной градуировочной зависимости того или иного косвенного метода испытаний.

В таблице 1 приведены основные параметры градуировочных зависимостей методов упругого отскока и ударного импульса, построенных по данным испытаний 15 образцов из бетона проектного класса С35/45 в возрасте 46 суток

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;  
 $H$  – косвенный параметр;

$s_{a1}$ ,  $s_{a0}$  – среднее квадратическое отклонение коэффициентов;  
 $r$  – коэффициент корреляции оценок прочности прессовыми испытаниями и косвенным методом по данной градуировочной зависимости.

Остаточное среднее квадратическое отклонение  $S_t$  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 данным косвенного метода испытаний;

На рис. 1 приведены градуировочные зависимости.

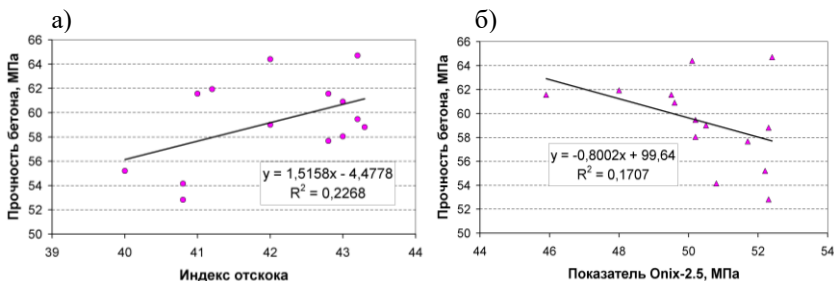


Рис. 1 Градуировочные зависимости: а - метода упругого отскока; б - метода ударного импульса

По данным таблицы 1 видно, что по показателю коэффициента остаточного среднего квадратического отклонения  $S_t$  зависимости удовлетворяют требованиям СТБ 2264 и ГОСТ 22690, но по коэффициенту корреляции  $r$  ни одна из зависимостей не удовлетворяет требованиям ГОСТ 22690. При этом данные прессовых испытаний подтвердили проектный класс бетона по прочности, коэффициент вариации прочности составил 6,2% при среднем значении прочности – 59,3 МПа. Кроме того, указанные зависимости не являются значимыми по критерию Фишера.

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. Но ввести количественную оценку качества уплотнения бетона или вариации его

состава в условиях строительной площадки затруднительно. 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  $F_i$  двух параметров бетона – прочности  $f_c^*$  и модуля упругости  $E_c^*$ , можем записать систему двух уравнений с двумя неизвестными  $f_c$  и  $E_c$

$$\begin{aligned} H_1 &= F_1(f_c^*, E_c^*) \\ H_2 &= F_2(f_c^*, E_c^*) \end{aligned} \quad (2)$$

Для проверки данной гипотезы была выполнена серия испытаний 20 образцов-кубов бетона проектного класса по прочности С30/37. В таблице 2 приведены данные испытаний

Таблица 2 Данные испытаний образцов

№ обр.	Срок тверд.	Масса	Показатель прочности «ONIX»	Индекс отскока «Shmidt»	Влажн. бетона	Прочн бетона
	$T$ <i>сут.</i>	$M$ $\rho$	$f_{c,onix}$ <i>МПа</i>	$I$	$W$ %	$f_c$ <i>МПа</i>
1	44	2388	32,2	36,8	4,6	45,0
2	44	2412	33,5	35,2	4,2	44,4
3	41	2318	40,7	39,5	5	45,7
4	41	2332	46,4	37,5	4,9	49,6
5	40	2436	33,9	35,2	4	47,9
6	40	2360	33,1	36,2	3,9	36,7
7	39	2354	36,2	34,2	3,8	39,8
8	39	2400	32,5	35,8	4,2	44,4
9	38	2320	31,2	32,8	2,9	36,7
10	38	2406	33,3	32,7	3	39,4
11	37	2282	28,5	31,3	3,6	36,3
12	37	2390	27,7	34,7	3,6	35,3
13	35	2404	31,3	29,7	3,6	32,9
14	35	2456	30,7	31,3	4	42,2
15	34	2422	32,6	34,2	3,9	37,0
16	34	2462	30,3	31,5	4,4	41,9
17	32	2426	32,3	37	3,9	40,5
18	32	2428	37,6	36,7	4,1	51,7
19	31	2428	35,6	36	3,8	39,4
20	31	2462	32,6	38,7	3,9	42,2

Использовались два косвенных неразрушающих метода – метод упругого отскока, метод ударного импульса, и метод испытания образцов по ГОСТ 10180. Дополнительно измерялись масса образцов и их влажность  $W$ .

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

$$\begin{aligned} f_c^* &= \Psi(H_1, H_2) \\ E_c^* &= \Omega(H_1, H_2) \end{aligned} \quad (3)$$

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

По приведенным в таблице 2 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.

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	$f_c^* = 0,76 \cdot f_{c,onix} + 15,8$	3,95	0,41	0,62	12,6
3	$f_c^* = 0,55 \cdot I + 4,81 \cdot W + 3,1$	<b>3,76</b>	<b>0,49</b>	<b>0,71</b>	<b>8,4</b>
4	$f_c^* = 0,46 \cdot f_{c,onix} + 4,18 \cdot W + 9,3$	<b>3,60</b>	<b>0,54</b>	<b>0,73</b>	<b>9,96</b>
5	$f_c^* = 0,561 \cdot f_{c,onix} + 0,560 \cdot I + 3,06$	<b>3,86</b>	<b>0,47</b>	<b>0,69</b>	<b>6,7</b>
6	$f_c^* = 0,384 \cdot f_{c,onix} + 0,324 \cdot I + 3,64 \cdot W + 2,77$	<b>3,63</b>	<b>0,55</b>	<b>0,74</b>	<b>7,5</b>

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;

$f_{c,onix}$  – косвенный показатель прочности прибора «Оникс-2.5»;

$S_t$  – остаточное среднее квадратическое отклонение градуировочной зависимости, МПа.

Все полученные зависимости являются значимыми по критерию Фишера. Введение в зависимости параметра влажности (зависимости №3 и №4) подтвердило справедливость сформулированной выше гипотезы. Остаточное среднее квадратическое отклонение  $S_t$  уменьши-

лось на 10%..16%. Коэффициент корреляции для обеих зависимостей превысил минимальное пороговое значение 0,7 (по ГОСТ 22690-2015). Объединение данных молотка Шмидта и прибора метода ударного импульса «Оникс» несколько улучшило показатели градуировки – (см. зависимость №5), 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.

#### *Заключение*

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

Двухпараметровые градуировочные зависимости, включающие влажность бетона в качестве дополнительного параметра, позволили снизить 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 двухпараметровых градуировочных зависимостей может быть рекомендована для включения в действующие нормативы, регламентирующие определение прочности бетона конструкций в построчных условиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля: ГОСТ 22690-2015. – М.: 2014. – 23 с.
2. Испытания бетона. Неразрушающий контроль прочности: СТБ 2264-2012 – Введ. 01.01.2013. – Минск: Госстандарт, 2013. - 20 с.
3. Снежков, Д.Ю. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович - Минск: БНТУ, 2016. - 330 с.
4. Pucinotti, R. The use of multiple combined non destructive testing in the concrete strength assessment: applications on laboratory specimens / R. Pucinotti // [Electronic resource], 2003. - Mode of access: [http://www.ndt.net/article/hsndtct2007/files/Pucinotti\\_Crisci\\_etat.pdf](http://www.ndt.net/article/hsndtct2007/files/Pucinotti_Crisci_etat.pdf). - Date of access: 02.02.2016