

РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ, МЕТОДИЧЕСКОГО И НОРМАТИВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ (СТАНДАРТ ПРЕДПРИЯТИЯ) СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО МОНИТОРИНГОВОГО КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕТОНА МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПЕРИОД ИХ ВОЗВЕДЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

СНЕЖКОВ Д.Ю., ЛЕОНОВИЧ С.Н.

Белорусский национальный технический университет

В настоящее время в Беларуси действуют 3 вида стандартов (рис. 1): национальные; стандарты РФ и стандарты Евросоюза, которые не согласуются между собой по отдельным позициям, в частности, - по критериям соответствия прочности бетона проектным показателям.

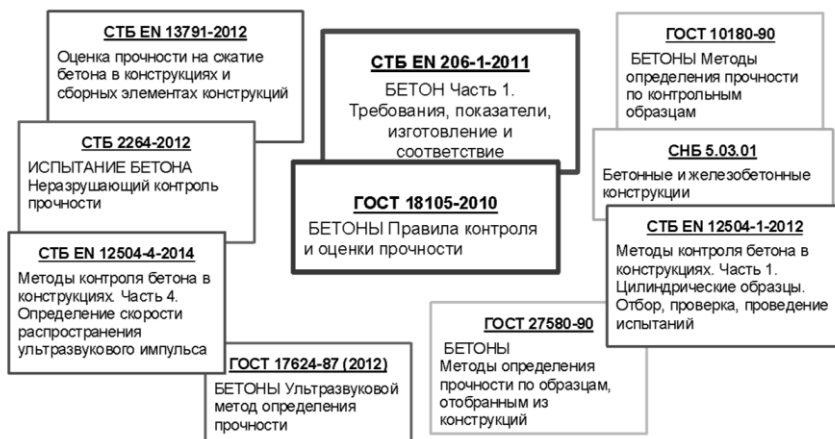


Рис. 1. Действующие нормативы, регламентирующие определение прочности бетона в конструкциях

Одним из путей адаптации неразрушающих испытаний бетона к используемой технологии выполнения бетонных работ может стать введение в повсеместную практику системы *стандартов предприятия* (СП). Стандарт предприятия имеет применение только на том предприятии, которое его выпустило. СП позволяет конкретизировать методы контроля, их адаптацию к конкретным технологиям

данной организации, установить свои критерии соответствия. Разумеется, СП не должны противоречить межгосударственным и национальным стандартам.

СТП «Контроль прочности бетона строящихся и эксплуатируемых зданиях и сооружениях ультразвуковым методом»

Разработанный стандарт предприятия использовался на строительстве горно-обогатительного комбината «Гарлык» (Туркмения), а также при возведении несущих монолитных каркасов ряда высотных зданий в г. Минске.



Рис. 2. Объекты мониторингового контроля прочности бетона неразрушающими методами испытаний

Основные отличительные позиции стандарта:

- методика определения неоднородности бетонного массива конструкции по упруго-прочностным показателям, на основе поверхностного и сквозного прозвучивания конструкции методом профилирования; косвенный параметр – дифференциальная скорость v_d распространения акустического импульса;
- методика комбинирования данных ультразвукового импульсного метода по ГОСТ 17624-2012 [7], СТБ EN 12504-4-2014 [10] и метода упругого отскока по СТБ 2264-2012;
- адаптированность по критериям соответствия класса по прочности бетона монолитных конструкций с СТБ EN 13791-2012 [9].

Возможным дополнением и расширением методики ГОСТ по оценке неоднородности бетона в изделии может служить методика выявления неоднородности/неравнопрочности бетона путем ультразвукового профилирования. Физической основой разработанной методики выявления неравнопрочности бетона на основе профилирования поверхности конструкций является зависимость средней скорости распространения импульса от базы измерения, когда часть пути акустический импульс проходит по участкам наружного слоя бетона с пониженной скоростью, а часть пути – с большей скоростью - через внутренние области массива.

Схемы профилирования представлены на рисунках 3, 4.

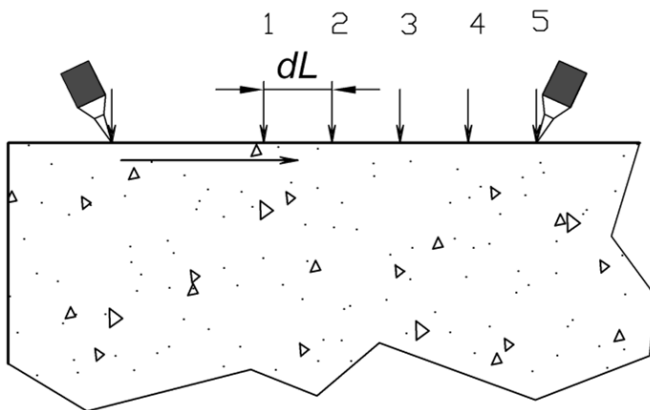


Рис. 3. Схема поверхностного прозвучивания бетона методом профилирования

Скорость распространения ультразвука V_δ для метода поверхностного профилирования рассчитывают как среднее арифметическое единичных значений скорости для каждого шага профилирования dL_i , которые рассчитываются по формуле

$$V_{\delta,i} = \frac{dL_i}{dt_i} \cdot 10^3, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (1)$$

где dt_i – приращение времени распространения ультразвука для i -го шага профилирования, мкс;

dL_i – шаг профилирования - расстояние между соседними позициями центров зон установки преобразователей, мм.

По мере увеличения базы измерения приращение времени распространения ультразвукового импульса $dt = t_{i+1} - t_i$ будет определяться приращением пути его распространения по внутренним слоям бетонного массива, что позволяет определить V_{Hi} - скорость ультразвукового импульса во внутренней области массива:

Скорость распространения ультразвука V_δ метода сквозного профилирования для случая ортогонального расположения граней конструкции рассчитывают как среднее арифметическое единичных значений скорости для каждого шага базы прозвучивания δL_i , которые рассчитываются по формуле

$$V_{\delta,i} = \frac{\delta L_i}{dt_i} = \frac{\sqrt{dL1_i^2 + dL2_i^2}}{dt_i} \cdot 10^3, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (2)$$

где δL_i – приращение базы прозвучивания, мм;

$dL1_i, dL2_i$ – шаги профилирования, мм.

При иной форме сечения конструкции, расчет скорости распространения производят по формуле (1), определяя приращение базы измерения исходя из геометрических соотношений. Шаг профилирования dL следует использовать одинаковым для всех позиций установки преобразователей. Длина шага, как показывают данные натурных испытаний, не должна быть меньше 100 мм. Данное ограничение связано, главным образом, с проявлением вариации скорости из-за структурной неоднородности бетона.

Построение профиля контроля позволяет косвенно выявить неоднородность массива бетона по прочности, оценивая скорость ультразвука во внутренней области сечения конструкции на участке L_{HI} и сравнивая ее со значением L_{LO} для периферийной области сечения.

Скорость ультразвука на участке L_{HI} будет соответствовать максимальному значению отношения приращения базы прозвучивания dL к приращению времени прохождения $dt = t_{i+1} - t_i$. Полученное максимальное значение скорости распространения V_{HI} следует принимать в качестве единичного значения скорости ультразвука на контролируемом участке при расчете прочности бетона конструкции. Пониженное значение скорости во внутренней области сечения по отношению к скорости ультразвука в приповерхностном слое бетонной конструкции находившейся в эксплуатации длительное время, может являться косвенным признаком карбонизации приповерхностного слоя бетона.

Для снижения инструментальной погрешности измерения времени распространения ультразвукового импульса рекомендуется испытания методом сквозного профилирования при базах прозвучивания превышающих 300 мм производить с использованием вязкого контакта преобразователей с поверхностью бетона.

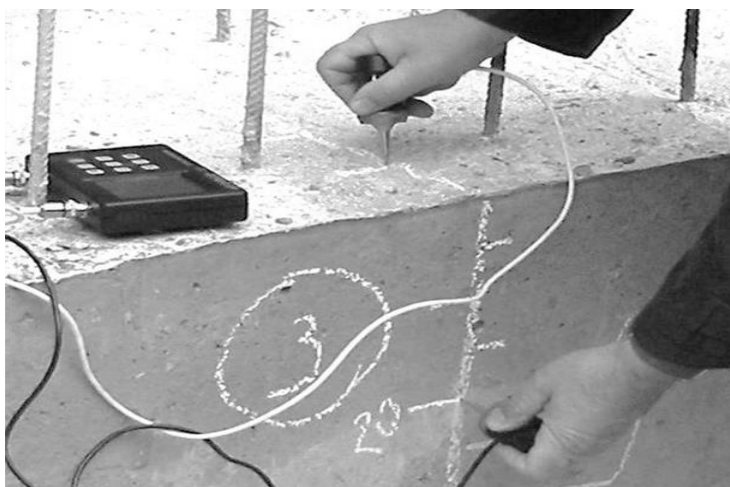


Рис. 6. Прозвучивание бетона методом сквозного профилирования

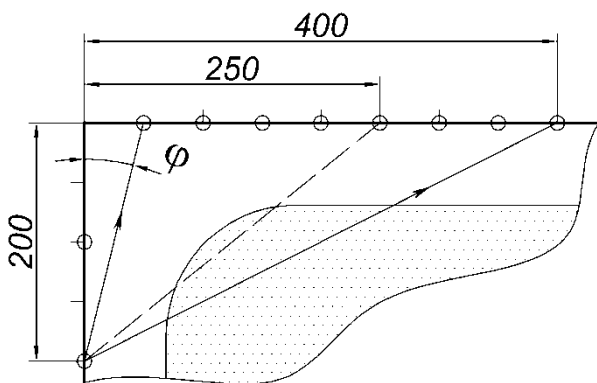
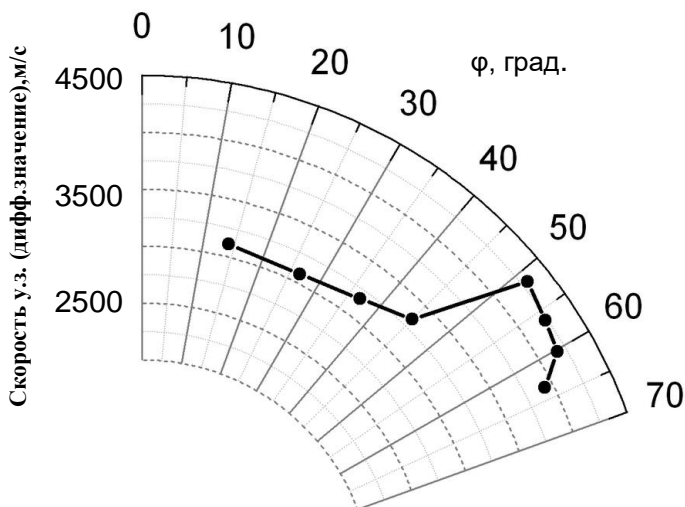


Рис. 7. Зависимости дифференциальной скорости распространения ультразвукового импульса от направления трека прозвучивания фундамента монолитной колонны

Комбинирование оценок прочности бетон: аддитивный метод

Комбинирование выполняется путем объединения оценок прочности бетона ультразвуковым методом и методом упругого отскока. Под комбинированным контролем понимается многопараметровый контроль. Результатом является общая оценка контролируемого па-

раметра. При этом каждый из косвенных параметров должен обладать свойством дополнительности по отношению к другим. Это приводит к взаимной компенсации некоторых погрешностей и повышению точности и достоверности результата. В зависимости от конкретной задачи и условий контроля комбинирование может выполняться по разным алгоритмам.

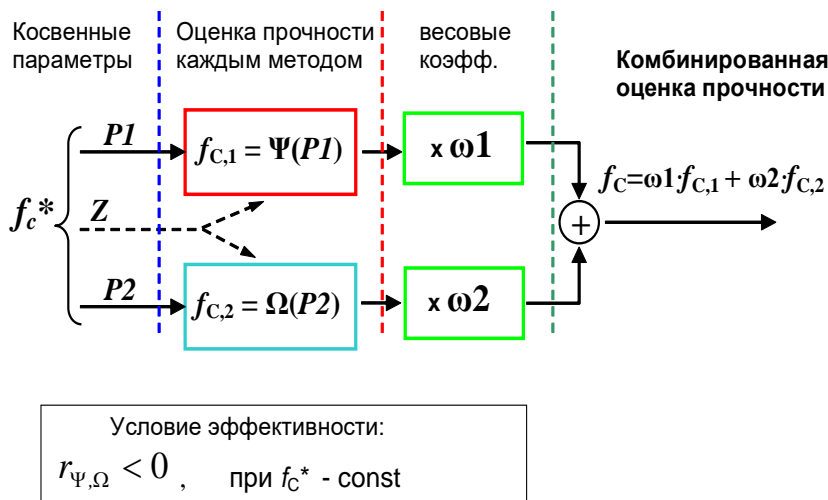
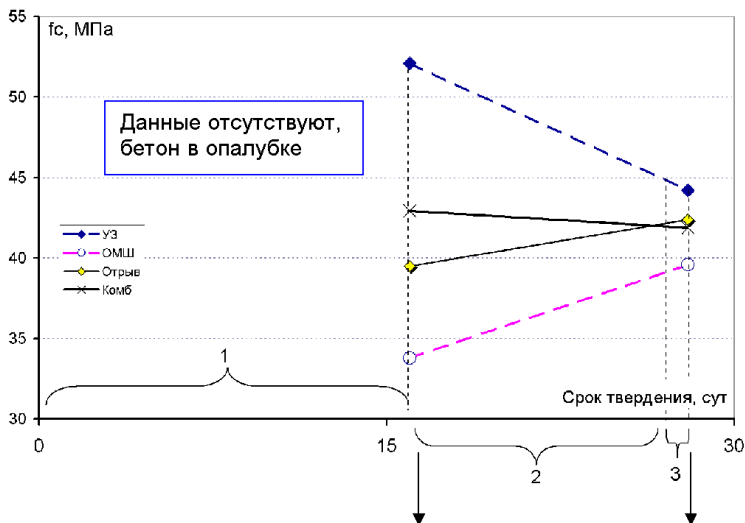


Рис. 8. Алгоритм объединения оценок прочности разных методов испытаний

На рисунке приведены диаграммы испытаний прочности бетона колонн находившихся на момент испытаний в замороженном состоянии более 5 суток Температура бетона на момент испытаний составляла -8°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.



$\Delta f_{C, I}$	6 МПа (15,2%).	3,6 МПа (9,1%)
$\Delta f_{C, US}$	13 МПа (33%).	2,8 МПа (7,2%)
$\Delta f_{C, COMB}$	3,6 МПа (9,0%)	0,8 МПа (2,1%)
$f_{C, Pull Out}$	39.5 МПа	42,5 МПа

Рис. 9. Кинетика твердения бетона в цикле замораживания и оттаивания

Характерным явилось и отрицательное значение коэффициента взаимной корреляции оценок прочности молотком Шмидта и ультразвуковым методом: $r_{Sh,us} = -0,24$.

Приведенные результаты 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 модуля упругости бетона при постоянной прочности.

Полученные данные показывают, что для оценки прочности бетона $f_{c, is}$ в проектном возрасте (28 сут) комбинированным методом, после его оттаивания в течение 4 суток при положительной темпе-

ратуре не требует введения каких-либо корректирующих коэффициентов при использовании следующей зависимости:

$$f_{c,is} = \frac{f_{c,us} + k \cdot f_{c,I}}{1 + k}, \quad (3)$$

где k – весовой коэффициент ($k = 1,31$); $f_{c,us}$, $f_{c,I}$ – оценки прочности бетона ультразвуковым методом и методом упругого отскока.

Применение формулы (3) для оценки прочности замороженного бетона дает завышение около 3 МПа, что составляет около 7%, что само по себе является удовлетворительным результатом, учитывая, что погрешности для отдельных методов входящих в комплекс составляю: для ультразвукового метода – 13 МПа (33%), для метода упругого отскока – 6 МПа (15,4%). Для коррекции комбинированного метода испытаний следует скорректировать весовой коэффициент k зависимости (3) до значения 1,93.

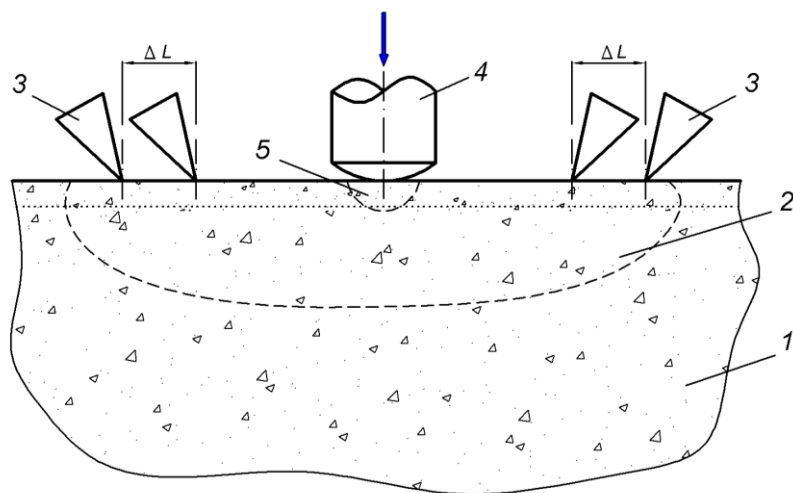
Экстраполирующий (мультипликативный) алгоритм комбинирования

Все приведенные выше данные неразрушающих методов получены испытанием поверхности изделий, что во многих случаях не может гарантировать достоверности оценки прочности массива бетона. Изготовление монолитных изделий при низких температурах, с использованием электродного прогрева или прогрева проводом, может приводить к заметным различиям температурного режима, а значит и различию показателей прочности наружных и внутренних слоев бетона, особенно при использовании металлической опалубки с недостаточной теплоизоляцией. Аналогичный эффект может вызвать раннее снятие опалубки, без принятия должных мер по удержанию в бетоне влаги и тепла. Поэтому, весьма важной для повышения достоверности контроля прочности бетона на основе комплекса неразрушающих методов выглядит потенциальная способность ультразвукового метода прохождения «чувствовать» состояние внутренних участков бетонного монолита, чем не обладает ни один из известных механических методов.

Свойство комплементарности (дополнительности) может рассматриваться в различных аспектах. Оно может выражаться отрицательным коэффициентом корреляции объединяемых оценок кон-

тролируемого параметра, а может быть выражено различием в пространственной локализации контролируемых областей бетона каждого из методов.. Комбинирование позволяет распространить (экстраполировать) с помощью калибровочного метода данные т.н. «опорного» метода на условия, в которых он не может быть применен. Например – выполнить контроль «виртуальным механически методом» в удаленной от поверхности области бетона.

На рисунке показаны границы областей бетона, физико-механические свойства которых проявляют себя в оценках прочностных показателей бетона склерометрическими методами и ультразвуковым методом прохождения. Измерения выполняются методом индентирования и ультразвуковым методом прохождения. Область 5 определяется диаметром отпечатка индентора 4 и радиус зоны пластической деформации бетона, а именно она определяет оценку прочности, приблизительно равен двойному диаметру отпечатка – 6...16 мм.



- 1 – контролируемое изделие; 2 – область бетона, участвующая в передаче ультразвукового импульса от излучателя к приемнику; 3 – излучающий и приемный ультразвуковые преобразователи; 4 – индентор; 5 – область индентирования бетона

Рис. 10. Схема измерений комбинированным методом «индентирование – ультразвуковой импульсный метод»

Область 2 – зона влияния на показатели ультразвукового метода. Границы зоны зависят от расстояния между преобразователями 3 , длины волны ультразвука и ее типа, и метода регистрации времени распространения ультразвукового импульса.

В соответствии с алгоритмом основу мультипликативной формы объединения составляет весовой (экстраполирующий) коэффициент для «опорного» метода. В этом случае второй из объединяемых методов является калибровочным для «опорного», например, ультразвуковой метод может быть калибровочным для метода динамического индентирования. Ультразвуковой импульсный метод используется в качестве калибровочного. С его помощью производится коррекция данных метода динамического индентирования.

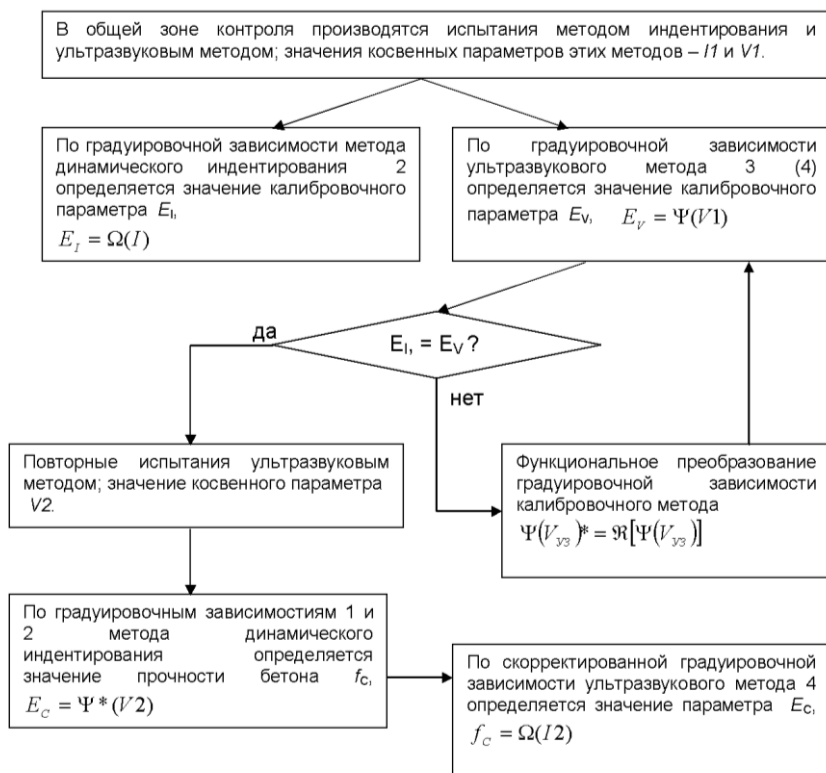


Рис. 11. Алгоритм объединение показателей неразрушающих методов контроля бетона в комплекс с использованием калибровочного метода

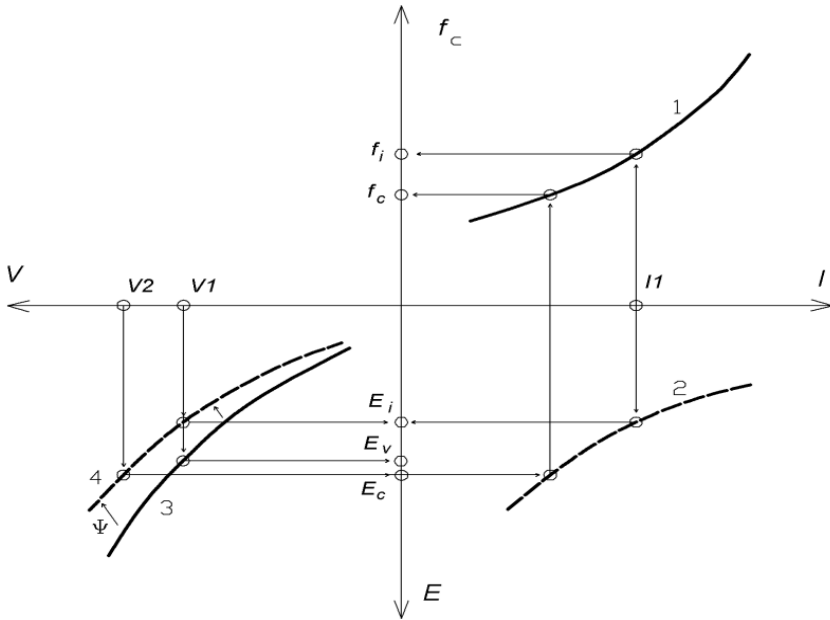


Рис. 12. Объединение показателей неразрушающих методов контроля бетона в комплекс с использованием калибровочного метода

Применительно к схеме реализации алгоритма следующая. В одной и той же зоне контроля производятся испытания методом индентирования и ультразвуковым методом; значения косвенных параметров этих методов – $I1$ и $V1$. Прочность бетона f_c участка контроля определяют в зависимости от разницы динамических модулей упругости поверхностного слоя бетона E^* и внутренней области бетона участка контроля $E_{\partial, v}$ из системы уравнений

$$f_c = \frac{1}{1 + \theta} \left(\theta \cdot e^{0.091(E_v - E)} f_{c, I} + f_{c, V} \right); \quad (4)$$

$$\theta = 0,0026 \cdot f_c^2 - 0,115 \cdot f_c + 2,79,$$

где f_c – прочность бетона в контролируемого участка конструкции, МПа; $f_{c, I}$ и $f_{c, V}$ – соответственно оценки прочности бетона участка контроля конструкции методом индентирования и ультразвуковым импульсным методом, МПа; θ – безразмерный коэффициент.

Список литературы

1. Бетон. Часть 1. Требования, показатели, изготовление и соответствие: СТБ EN 206-1-2011.
2. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. – Минск: Минстройархитектуры, 2003. – 139 с.
3. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-90. – Введ. 01.01.91. – М.: 1991. – 16 с.
4. Бетоны. Правила контроля прочности: ГОСТ 18105-2010. – Введ. 01.09.12. – М.: 2010. – 16 с.
5. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности: ГОСТ 17624-2012. – Введ. 01.01.88. – М.: 1988. – 12 с.
6. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций: ГОСТ 28570-90 – Введ. 01.01.91. – М.: 1991. – 14 с.
7. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности: ГОСТ 17624-2012. – Введ. 01.01.2014. – М.: 2014. – 19 с.
8. СТБ 2264-2012 Испытание бетона. Неразрушающий контроль прочности.
9. СТБ EN 13791-2012 Оценка прочности на сжатие конструкций и элементов сборного бетона в реальных условиях. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2012.
10. СТБ EN 12504-4-2014 Методы контроля бетона в конструкциях. Часть 4. Определение скорости распространения ультразвукового импульса
11. Снежков, Д.Ю. Неразрушающий контроль бетона в монолитном строительстве: совершенствование средств и методов / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович. – Минск: БНТУ, 2006. – 218 с.
12. Снежков, Д.Ю. Неразрушающий контроль бетона монолитных конструкций / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович // Строительная наука и техника, №4(25), 2009. С. 76-84.
13. Pucinotti, R. The use of multiple combined non destructive testing in the concrete strenght assentent: 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: 02.02.2008.