

ПРИМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЭХОИМПУЛЬСА В КАЧЕСТВЕ МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И ОДНОРОДНОСТИ БЕТОНА

© 2022 г. М.А. Абреу Филью^{1,2,*}, К. Морено³, Е. Лусо^{1,3}

¹Институт устойчивого развития и инноваций в области строительства, Гимарайни, Португалия

²Университет Минью, Гимарайни, Португалия

³Политехнический институт Браганса, Браганса, Португалия

*E-mail: marcoabreufilho@hotmail.com

Поступила в редакцию 04.02.2022; после доработки 18.02.2022

Принята к публикации 18.02.2022

Ультразвуковой метод является одним из методов неразрушающего контроля, который наиболее технологически продвинулся за последние несколько лет. Это исследование направлено на проверку точности и возможностей этого метода при определении механических свойств бетонных элементов с использованием оборудования ультразвуковой томографии, основанного на использовании скорости эхоимпульса (S-волны). Модуль упругости и прочность бетона на сжатие оцениваются по скорости эхоимпульса. Кроме того, оценивается однородность бетонных элементов. Расчет прочности бетона на сжатие был произведен для кубических образцов, а достигнутая точность составила более 91 % с использованием аналитического подхода, предложенного в этой работе. Коэффициент корреляции между скоростью эхоимпульса и силой одноосного сжатия, обнаруженный в этом исследовании, составил более 97 %. Таким образом, оказалось эффективным использование ультразвукового метода НК для оценки однородности бетонных элементов.

Ключевые слова: методы НК; бетонные конструкции; ультразвуковой эхоимпульс, S-волны.

DOI: 10.31857/S0130308222040054, **EDN:** BLJAFZ

1. ВВЕДЕНИЕ

Бетон является одним из наиболее широко используемых строительных материалов в мире и представляет собой смесь цемента, воды и заполнителей, а современный бетон содержит все больше и больше минеральных компонентов, химических добавок, полимерных волокон и т.д. [1]. Бетон является конструкционным материалом, который может обладать характеристиками, способными изменяться в широком диапазоне, даже при использовании одинаковых параметров производства и одного и того же сырья [2]. Учитывая эту изменчивость, европейский стандарт EN 206-1 [3] устанавливает, что весь произведенный бетон должен подвергаться производственному контролю, дополнительно должна быть аттестована его прочность на сжатие.

Предполагается, что бетон достигает проектной прочности через 28 дней. Обычно изменение прочности контролируют с помощью разрушающих испытаний образцов, изготовленных из тех же партий бетона, которые использовались на строительной площадке. Однако результаты испытаний получены в контролируемых лабораторных условиях и могут не отражать реальные характеристики бетона при эксплуатации [4, 5].

Для оценки механических характеристик бетона по месту эксплуатации методы неразрушающего контроля (НК) представляют определенный интерес, поскольку они позволяют определять свойства материалов, оставаясь при этом быстрыми и недорогими [5]. Несмотря на то, что испытание ядра из бетона стало наиболее эффективным методом прямой оценки прочности бетона на сжатие в процессе эксплуатации [6], в некоторых ситуациях этот метод не может быть рекомендован или даже невозможен [7, 8]. Кроме того, такой метод малоразрушающего контроля (МК) требует больше рабочего времени и нецелесообразно проводить пробоотбор на больших площадях [9]. С другой стороны, в последние годы технологии НК развиваются, их стоимость снижается, а интерес к ним растет [10]. Растущий интерес к НК также можно объяснить необходимостью оценки существующих сооружений [11]. Такая оценка требуется в различных ситуациях: (а) когда некоторые повреждения возникли спустя время; (б) когда необходимо учитывать новые требования из-за изменений выдерживаемых нагрузок; (в) когда состояние материала должно быть проверено вследствие возникающих подозрений [5].

Другим преимуществом, связанным с портативностью средств неразрушающего контроля, является тот факт, что увеличение количества измерений связано с минимальным увеличением стоимости испытаний [12]. Однако такие методы предоставляют информацию о тех физических свойствах, которые коррелируют с механическими свойствами, в отличие от разрушающих мето-

дов контроля, которые непосредственно определяют механические характеристики [11]. Из-за качества оценки, на которую могут повлиять некоторые погрешности, европейский стандарт EN 13791 [13] устанавливает, что методы НК должны быть откалиброваны по результатам испытаний керна из бетона.

Использование ультразвуковых методов НК в последние годы получило значительное развитие, и, как большое преимущество, ультразвуковой контроль выполняется с помощью портативного оборудования. Он используется *in-situ* непосредственно на самом сооружении, не вызывая никаких повреждений конструкции, что делает его важным инструментом для улучшения контроля качества и помощи в определении характеристик и диагностике существующих сооружений.

С помощью обычного ультразвукового оборудования (ОУО) определяется скорость, с которой продольная волна (Р-волна) проходит через бетон. Процедура измерения этой скорости установлена европейским стандартом EN 12504-4 [14]. По скорости ультразвука можно: (а) оценить динамический модуль упругости; (б) определить однородность бетонного элемента или деталей, изготовленных из одной и той же партии бетона; (в) следить за внутренними изменениями свойств с течением времени; (г) оценивать контроль качества; (д) оценивать глубину трещин [14].

Данная работа направлена на проверку точности и возможностей метода контроля для оценки механических свойств бетонных элементов с использованием современного ультразвукового томографического оборудования (УТО), которое определяет скорость импульса поперечных волн (S-волна), в отличие от традиционного оборудования. Ожидается, что УТО может предоставить более репрезентативные данные по сравнению с ОУО.

2. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ

Первые работы, посвященные возбуждаемым механическим импульсам в бетоне, датируются серединой 40-х гг. XX века. Главный вывод, который следовал из тех исследований, это то, что скорость ультразвукового импульса в твердом материале зависит, в первую очередь, от упругих свойств, позволяющих напрямую оценивать механические свойства бетона, а именно: его прочность на сжатие.

Ультразвуковой контроль проводился с использованием прибора, реализуемого под названием PUNDIT [12] (аббр. от Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester — портативный ультразвуковой дефектоскоп с цифровой индикацией). Традиционное оборудование для испытания ультразвуковыми волнами (рис. 1) измеряет скорость Р-волн [12, 16].



Рис.1. Традиционное оборудование для испытания ультразвуковыми волнами.

Основное применение ультразвукового метода неразрушающего контроля — возможность оценки модуля упругости бетона.

Такая оценка проводится с применением скорости импульса ультразвуковой Р-волны по уравнению [17]:

$$E_d = \frac{V^2 \cdot \rho}{K}, \quad (1)$$

где E_d — динамический модуль упругости, Па; V — это скорость продольной волны (Р-волны), м/с; ρ — плотность бетона, кг/м³; K — константа, зависящая от коэффициента Пуассона ν , согласно уравнению:

$$K = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}. \quad (2)$$

В представленной работе использовалось оборудование PL-200PE от Proceq, УТО (рис. 2) измеряет скорость S-волн. S-волны имеют преимущество перед Р-волнами в плане большей статической устойчивости [18].



Рис. 2. УТО.

Принцип работы основан на измерении времени прохождения ультразвукового импульса в твердом теле и получении соответствующего эха. Каждый из девяти датчиков на левой стороне рукоятки, как показано на рис. 2, соединен с соответствующим датчиком справа. Излучатели импульсов, расположенные слева, постоянно излучают ультразвуковые импульсы, а приемники импульсов, расположенные справа, принимают соответствующие эхосигналы, как показано на рис. 3 [19, 20].

Скорость импульса, измеряемая с помощью УТО, определяется при отдельной расшифровке сигналов девяти пар преобразователей. Используя данное оборудование, результаты контроля в каждом отдельном измерении будут более репрезентативными, чем результаты при использовании традиционного оборудования, которое имеет только по одному излучающему и принимающему преобразователю, а измеряемая скорость импульса определяется только в одном направлении.

Первым шагом в данном исследовании было обеспечение аналитической оценки прочности бетона по скорости импульса, определяемой УТО (S-волны), как это возможно и с использованием Р-волн.

Так как механизмы распространения Р-волн и S-волн различны, то их скорость в бетоне тоже различна. Scott [21] отмечает, что скорость S-волн составляет примерно 60 % от скорости Р-волн.

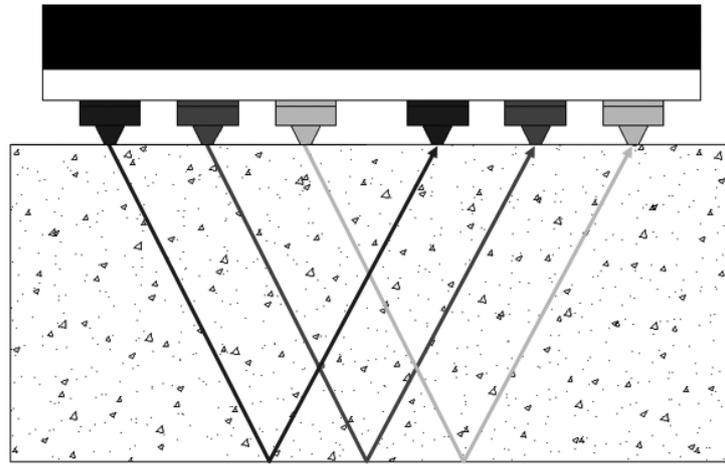


Рис. 3. Принцип работы УТО.

Подобное соотношение между скоростями S-волн и P-волн обнаружено в исследованиях, проводимых Birgul [22] и Lee и Oh [23].

Внутренняя влага бетона оказывает влияние на скорость P-волн, Bungey [15] отмечает, что скорость увеличивает примерно на 5 % по сравнению с сухим бетоном, при этом S-волны не проходят через газообразные и жидкие среды, что означает, что внутренняя влажность не влияет на их скорость [24].

Другие факторы влияют на скорость импульса обоих типов волн. Ravibdraraja [25] и Evelgy и Ibrahim [26] подтвердили в своих исследованиях, что тип бетона влияет на скорость импульса, Elvery и Ibrahim [26] даже подтвердили, что это влияние становится все большим в первые годы, что может негативно сказаться на точности установления взаимосвязи между скоростью ультразвука и прочностью бетона. Evangelista [27] в своей работе сделала вывод о том, что тип цемента может изменять скорость импульса приблизительно на 5 %.

Lee и Lee [28] в своих работах сделали вывод, что наличие крупного заполнителя значительно влияет на скорость импульса в бетоне в ранние годы, обнаружено, что скорость импульсов на 16 % выше в бетоне по сравнению с раствором. Однако Silva и др. [18] в своих исследованиях показали, что количество крупного заполнителя не имеет значительного влияния на скорость импульса.

Температура (если находится в пределах диапазона требований к эксплуатации) и уровень напряжений (кроме ситуаций чрезмерного напряжения) являются переменными, которые не влияют существенным образом на скорости импульсов [15, 26].

Чтобы преодолеть факторы, влияющие на скорость импульса, и сделать возможным использование S-волн для оценки прочности бетона, данное исследование нацелено на поиск альтернативы уравнения (1), в котором переменная V должна изменяться так, как показано в уравнениях (3) и (4). Уравнение (3) подходит для бетона возрастом между 3 и 28 днями, а уравнение (4) — для бетона возрастом более 28 дней:

$$V = 1,65 \cdot V_{\text{echo}} \cdot \exp(0,48 \cdot s \cdot j^{-0,1}); \quad (3)$$

$$V = 1,65 \cdot V_{\text{echo}} \cdot \exp(0,3439 \cdot s), \quad (4)$$

где V — скорость сжатия импульса (P-волны); V_{echo} — скорость эхоимпульса, измеренная посредством УТО (S-волны), м/с; s — коэффициент, который зависит от типа цемента, как показано в табл. 1; j — возраст бетона, сутки.

Предлагаемый аналитический метод позволяет оценивать динамический модуль упругости бетона, используя скорость эхоимпульса (S-волны) посредством УТО, с применением модифицированного уравнения (1). Динамический модуль упругости E_d , который оценивается по скорости

Таблица 1

Значения s согласно типу цемента

s	Тип цемента
0,20	CEM 42,5R, CEM 52,5 N, CEM 52,5R (класс R)
0,25	CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (класс N)
0,38	CEM 32,5 N (класс S)

Источник: адаптировано из EN-1992 [29].

импульса ультразвука, эквивалентен тангенциальному модулю упругости E_c [30]. Согласно EN 1992 [29], по тангенциальному модулю упругости возможно рассчитать секущий модуль упругости бетона E_{cm} , используя уравнение:

$$E_c = 1,05 \cdot E_{cm}. \quad (5)$$

По секущему модулю упругости напряжение сжатия может быть рассчитано с использованием уравнения, взятого из EN-1992 [29]:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{0,3}. \quad (6)$$

где E_{cm} — величина модуля упругости, ГПа; f_{ck} — характеристическая прочность на сжатие цилиндра бетона.

3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Чтобы подтвердить эффективность оборудования и что предложенный аналитический метод позволяет использовать уравнение (1) с S-волнами, соответствующей процедурой является оценка результатов, полученных УТО в лабораторных условиях. Таким образом, цель программы эксперимента, представленного здесь, направлена на контроль образцов из обычной бетонной смеси цемента, воды и обычных заполнителей.

3.1. Подготовка образцов

Материалом для создания тестовых образцов был известняковый портландцемент компании Secil, состав которого согласно EN 197-1 [31]: CEM II B/L-32.5, гранитный гравий 8/14, природный песок 0/4 и вода.

Для эксперимента в лаборатории Политехнического института Браганса были произведены 18 кубических образца бетона размерами 15×15×15 см и 3 образца в виде призм 15×15×55 см. Были изготовлены 3 различные смеси и обозначены как M1, M2 и M3. Пропорции песка, гравия, воды по отношению к массе цемента, используемые в каждой смеси, показаны в табл. 2.

Таблица 2

Пропорции для изготовления бетонных смесей

Пропорции	Цемент	Песок	Гравий	Вода
M1	1	1,28	2,28	0,40
M2	1	1,95	2,95	0,50
M3	1	1,28	2,28	0,55

Вязкость смесей определялась с помощью испытания на распыл. Все бетонные смеси имели консистенцию класса S1, согласно стандарту standard EN 12350-2 [32]. Были изготовлены 6 кубических образцов, пронумерованные от 1 до 6, для каждой бетонной смеси. Кубический образец

бетона 1, сделанный из смеси М1, обозначался как С1—М1, а другие обозначались как (С n —М1, С n —М2 и С n —М3 при $n = 6$), следуя такой же логике.

Из трех произведенных призм две были сделаны из бетонной смеси М2 (обозначались как Р1—М2 и Р2—М2) и одна — из смеси М1 (Р1—М1)

Кубические образцы (С n —М1, С n —М2 и С n —М3) отвердевали после извлечения из формы при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности 90 %. После 28 дней процесса отверждения были проведены испытания на одноосное сжатие с контролем нагрузки в машине для испытаний на сжатие от Matest.

Образцы в виде призм (Р1—М1, Р1—М2 и Р2—М2) также находились в процессе отвердевания при температуре $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности 90 % в течение 28 дней. После этого еще 62 дня они находились в условиях лабораторной атмосферы. Для этих образцов возрастом 90 дней проводились испытания на сжатие и ультразвуковой контроль.

Для проведения механических испытаний данных призм потребовалось разрезать их на три равных кубических образца размерами 15×15×15 см (оставшаяся часть 15×15×10 см в последующих экспериментах не использовалась). Измерения с помощью ультразвукового оборудования проводились до и после разрезания призматических образцов.

3.2. Методика испытаний

Сначала кубические образцы (С n —М1, С n —М2 и С n —М3) контролировали УТО и измеряли V_{echo} . Полученные результаты использовали для аналитической оценки модуля упругости и прочности на сжатие бетона. V_{echo} определяли в трех местах каждого образца: сверху, снизу и по центру (рис. 4). Измерения проводили, когда возраст бетона составлял 3, 7, 14, 21 и 28 дней.

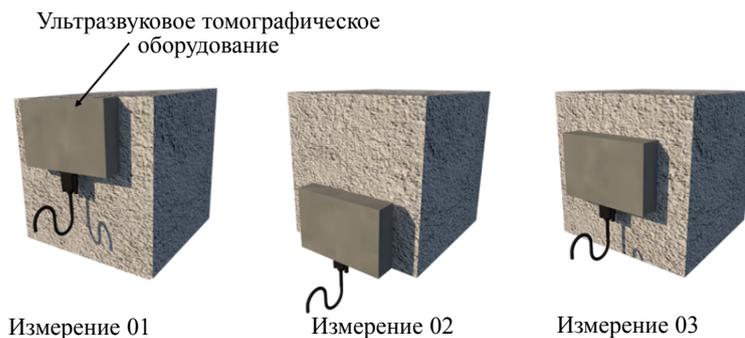


Рис. 4. Положение датчика УТО при измерениях на кубических образцах.

Призматические образцы (Р1—М1, Р1—М2 и Р2—М2) контролировали в возрасте 90 дней. Три измерения проделывали с целью получить представление об их однородности. Положение точек измерений было в центре между последующими разрезами (рис. 5).

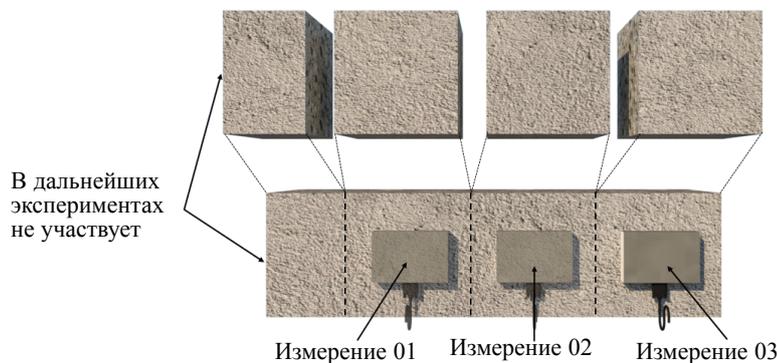


Рис. 5. Положение датчика для измерения скорости импульса на призматических образцах для проверки однородности, предусматривая будущие разрезы.

Для частей призматических образцов (P1—M1.*n*, P1—M2.*n* и P2—M2.*n* при *n* = 3) определялась скорость ультразвукового импульса, чтобы оценить модуль упругости и прочность на сжатие более точно для каждого сегмента.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Кубические образцы

Результаты измерения скорости импульса использовали для оценки модуля упругости и прочности на сжатие образцов. Во-первых, применяли уравнение (3) и полученные результаты в виде переменной *V* подставляли в уравнение (1). Расчетный динамический модуль упругости делился на 1,05, чтобы получить секущий модуль упругости для каждого образца. Нормативная прочность на сжатие f_{ck} рассчитывалась для каждого образца с использованием уравнения (6) согласно EN-1992 [29].

Нормативную прочность на сжатие кубического образца $f_{ck,cube}$ рассчитывали, используя численную интерполяцию из табл. 3.1 EN-1992 [29], как показано в табл. 3.

Таблица 3

Раздел таблицы 3.1 из EN-1992 [29]

Параметр	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55
f_{ck} , МПа	12	16	20	25	30	35	40	45
$f_{ck,cube}$, МПа	15	20	25	30	37	45	50	55

Таблица 4

Модуль упругости и прочность на сжатие кубических образцов, оцениваемых по скорости импульса ультразвука, прочности на сжатие, полученной при разрушающем контроле, и соответствующие погрешности

Образец	V_{echo} , м/с	E_{cm} , ГПа	f_{ck} (AM), МПа	$f_{ck,cube}$ (AM), МПа	$f_{ck,cube}$ (PK), МПа	Погрешность, %
C1—M1	2139	33,3	31,7	39,8	38,0	4,63
C2—M1	2098	32,0	26,9	32,7	34,8	-6,12
C3—M1	2116	32,6	29,0	35,6	35,5	0,19
C4—M1	2116	32,6	29,0	35,6	35,7	-0,24
C5—M1	2083	31,6	25,3	30,4	31,7	-4,10
C6—M1	2083	31,6	25,3	30,4	31,1	-2,25
C1—M2	2055	30,7	22,4	28,0	27,5	1,81
C2—M2	2055	30,7	22,4	28,0	27,8	0,72
C3—M2	2069	31,1	23,8	29,8	28,1	6,05
C4—M2	2083	31,6	25,3	30,4	29,0	4,83
C5—M2	2028	29,9	19,9	24,8	25,6	-2,85
C6—M2	2055	30,7	22,4	28,0	28,2	-0,71
C1—M3	2013	29,5	18,5	23,1	22,9	0,87
C2—M3	2055	30,7	22,4	28,0	25,7	8,95
C3—M3	2041	30,3	21,1	26,4	24,3	8,64
C4—M3	2041	30,3	21,1	26,4	24,6	7,32
C5—M3	2027	29,9	19,8	24,7	23,3	6,17
C6—M3	2000	29,1	17,4	21,7	22,0	-1,28

В табл. 4 представлены результаты расчета секущего модуля упругости E_{cm} , прочностей на сжатие f_{ck} и $f_{ck,cube}$ аналитическим методом (AM) через скорость импульса ультразвука и прочность на сжатие $f_{ck,cube}$ полученной разрушающими методами контроля (PK).

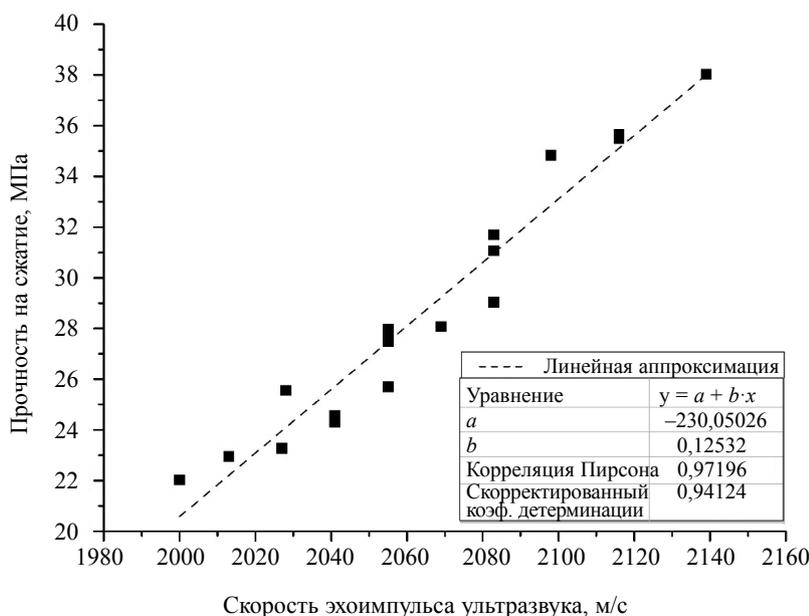


Рис. 6. Линейная аппроксимация.

Табл. 4 показывает, что оценка прочности на сжатие по скорости импульса ультразвука имеет погрешность в диапазоне от $-4,40$ до $8,95$ %. Используя измеренную с помощью УТО V_{echo} (S-волны) и прочность на сжатие, полученную при РК, была проделана линейная аппроксимация между двумя полученными величинами, как показано на рис. 6.

График показывает, что возможно установить коэффициент корреляции между скоростью эхоимпульса ультразвука и прочностью на сжатие бетона выше 97 % с доверительной вероятностью выше 94 % при линейной аппроксимации.

Рис. 7 и 9 показывают сравнение между: (а) кривая изменения прочности, рассчитанная аналитически, используя измерения скорости ультразвукового импульса при возрасте бетона 3, 7, 14, 21, 28 дней; (б) обратный анализ по результатам РК, используя уравнение 7 из Eurocode 2 [29]:

$$f_{ck}(t) = (\beta_{cc}(t) \cdot f_{cm}) - 8, \tag{7}$$

где $f_{ck}(t)$ — нормативная прочность на сжатие для возраста бетона t , МПа; f_{cm} — нормативная прочность на сжатие, полученная разрушающим методом, а $\beta_{cc}(t)$ рассчитывают по уравнению:

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\}, \tag{8}$$

где t — возраст бетона, дни; s — коэффициент, который зависит от типа цемента, как показано в табл. 1.

Из рис. 7—9 можно увидеть, что кривая изменения прочности на сжатие, рассчитанная аналитически по скоростям импульса ультразвука, показала схожее поведение с результатами обратного анализа, проводимого по результатам разрушающего контроля. Большинство образцов показали почти постоянную погрешность при старении бетона до 28 дней.

4.2. Призматические образцы

Первым испытанием, проводимым на призматических образцах, была проверка однородности до их разрезания. Были проведены три измерения скорости эхоимпульса в центральной части между разрезами в призматическом блоке, как показано на рис. 5. На рис. 10 показаны результаты, полученные для трех образцов в схематическом и графическом представлении.

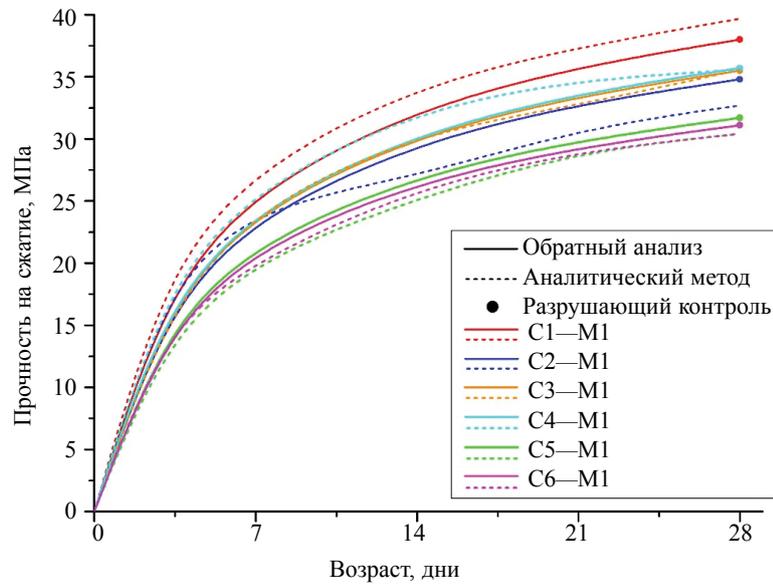


Рис. 7. Кривые изменения прочности на сжатие, обратный анализ и аналитический метод для образцов, произведенных из бетонной смеси М1.

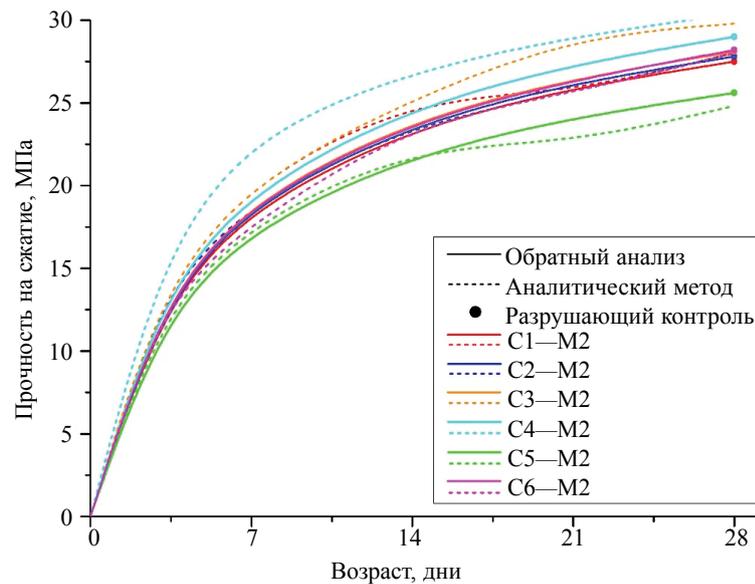


Рис. 8. Кривые изменения прочности на сжатие, обратный анализ и аналитический метод для образцов, произведенных из бетонной смеси М2.

Результаты, показанные на рис. 10, приводят к заключению, что призма Р1—М2 имеет хорошую однородность, призма Р1—М1 имеет среднюю однородность, а призма Р2—М2 имеет низкую однородность.

После контроля однородности призматические образцы разрезались на три части размерами $15 \times 15 \times 15$ см, а оставшаяся часть $10 \times 15 \times 15$ см выбрасывается. Вновь проводилось измерение эхоимпульса ультразвука (на этот раз в соответствии с рис. 4) в каждой из трех частей призм. Части призм пронумерованы слева направо; выброшенная часть располагалась в крайнем левом углу.

В табл. 5 представлены результаты контроля УТО после разрезания призматических образцов. В табл. 5 также показаны V_{echo} ; секущий модуль упругости, рассчитанный по уравнению (1) (результат которого делится на 1,05), где переменная V заменялась результатом расчета по уравне-

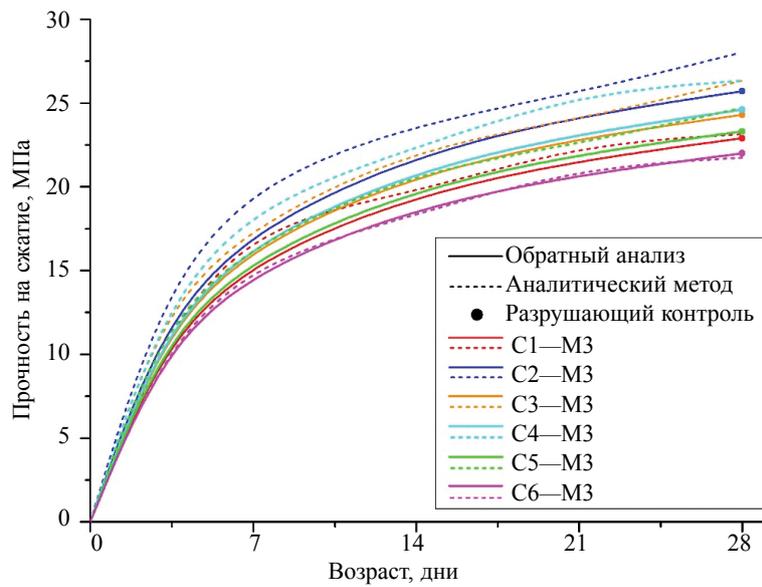


Рис. 9. Кривые изменения прочности на сжатие, обратный анализ и аналитический метод для образцов, произведенных из бетонной смеси М3.

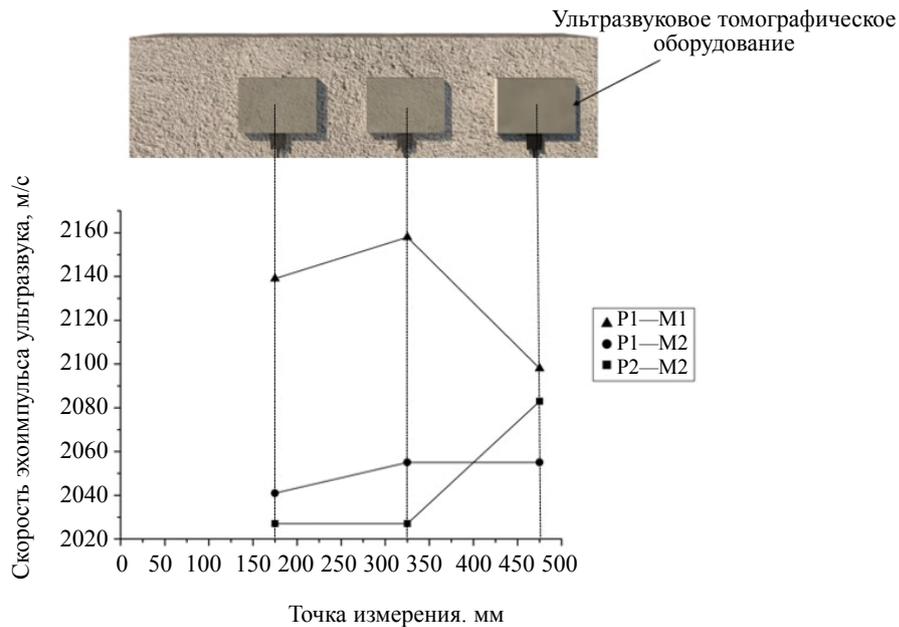


Рис. 10. Схематическое и графическое представление испытания на однородность с использованием УТО.

нию (4); прочность на сжатие, рассчитанная по уравнению (6) из EN-1992 [29]; прочность на сжатие, полученная при разрушающем контроле, а также соответствующие погрешности. Испытания проводились в возрасте 90 дней.

Оценка прочности на сжатие частей призм с помощью ультразвукового контроля и прочности на сжатие при разрушающем контроле имела погрешности в диапазоне от $-7,80$ до $3,39$ %, что показывает хорошую точность. Только в двух частях (P1—M1.3 и P2—M2.2) измеренная скорость эхоимпульса изменялась после того, как образцы были нарезаны. Следовательно, согласно гипотезе, выдвинутой после первой проверки однородности, возможно подтвердить разрушающим методом, что призма P1—M2 была образцом с хорошей однородностью, призма P1—M1 имела среднюю однородность, а призма P2—M2 имела низкую однородность.

Таблица 5

Прочность на сжатие частей призматических образцов, оцениваемая по скорости эхоимпульса ультразвука, прочность на сжатие по результатам разрушающего контроля и соответствующие погрешности

Образец	V_{echo} , м/с	E_{cm} , ГПа	f_{ck} (АМ), МПа	$f_{\text{ck,cube}}$ (АМ), МПа	$f_{\text{ck,cube}}$ (ПК), МПа	Погрешность, %
P1—M1.1	2139	33,3	31,7	39,8	39,5	0,74
P1—M1.2	2158	33,9	34,1	43,6	42,2	3,39
P1—M1.3	2116	32,6	29,0	35,6	36,3	-2,02
P1—M2.1	2041	30,3	21,1	25,5	26,7	-4,49
P1—M2.2	2055	30,7	22,4	27,2	27,4	-0,73
P1—M2.3	2055	30,7	22,4	27,2	27,3	-0,37
P2—M2.1	2027	29,9	19,8	24,7	25,2	-2,14
P2—M2.2	2013	29,5	18,5	23,1	23,2	-0,33
P2—M2.3	2083	31,6	25,3	30,4	33,0	-7,80
P1—M1.1	2139	33,3	31,7	39,8	39,5	0,74
P1—M1.2	2158	33,9	34,1	43,6	42,2	3,39
P2—M2.3	2083	31,6	25,3	30,4	33,0	-7,80

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование дало возможность понять потенциал современного УТО для определения механических свойств бетона. Оборудование, которое использовалось в эксперименте, работает с поперечными волнами (S-волны), что отличается от ОУО, которое обычно измеряет продольные волны (Р-волны). В результате проведения данной работы могут быть построены следующие выводы:

с помощью аналитического метода, предложенного в данном исследовании, путем модификации уравнения (1), позволяющего использовать скорости импульсов S-волн для оценки динамического модуля упругости, можно было достичь точности более 91 % в прогнозировании прочности бетона на сжатие;

скорость эхоимпульса (V_{echo}) показала сильную линейную корреляцию с прочностью на сжатие, был достигнут коэффициент корреляции выше 97 % с доверительной вероятностью выше 94 %;

оценка однородности бетона оказалась возможной и точной. Измерения до и после разрезания призмы совпадали, только две части (из девяти) показали изменения скорости ультразвуковых импульсов. Тем не менее эти изменения составили менее 1 %;

аналитический метод пригоден, даже если пользователь не имеет информации о типе цемента, среднее значение s из табл. 1 может быть использовано в уравнениях (3) и (4). Однако это уменьшает точность прогнозирования прочности на сжатие на 8 %;

ультразвуковой метод НК оказался интересным для мониторинга изменения прочности на сжатие бетона;

соотношение вод и цемента не влияет на доверительную вероятность установления корреляции между скоростью ультразвуковых импульсов и прочностью на сжатие бетона.

Проведение экспериментов с ультразвуковым оборудованием показало, что, когда он выполняется тщательно и систематически, такой метод является очень практичным методом НК. Однако важно указать, что УТО имеет высокую чувствительность, результаты меняются при незначительном изменении давления, прикладываемого к преобразователям. Для получения надежных результатов требуется компетентный пользователь, обученный работе с таким устройством.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aiçin P.C.* Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow // *Cement and Concrete Research*. 2000. V. 30 (9). P. 1349—1359.
2. *Krause M., Bärman M., Frielinghaus R., Kretschmar F., Kroggel O., Langenberg K.J., Maierhofer C., Müller W., Neisecke J., Shickert M., Shmitz V., Wiggerhauser H., Wollbold F.* Comparison of pulse-echo methods for testing concrete // *NTD&E International*. 1997. V. 30 (4). P. 195—204.
3. CEN — European Committee for Standardization / Concrete — Part 1: Specification, performance, production and conformity. Brussels: EN 206-1, 2000.

4. *Telisak T., Carraquilha, Fowler D.W.R.* Early age strenght of concrete: a comparison of several nondestructive teste methods. Texas: Center for Transportation Research, 1991.
5. *Shah S.P., Subramaniam K.V.* Use of nondestructive ultrasonic techniques for material assessment and in-service monitoring of concrete structures // NDTnet. 2000. V. 5.
6. *Vona M., Nigro D.* Evaluation of the predictive ability of the in situ concrete strength through core drilling and its effects on the capacity of the RC columns // Materials and Structures. 2015. No. 48. P. 1043—1059.
7. *Schabowicz K., Suvorov V.A.* Nondestructive testing of a bottom surface and construction of its profile by ultrasonic tomography // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. No. 2. P. 109—119.
8. *Brigante M., Sumbatyan M.A.* Acoustic methods for the nondestructive testing of concrete: a review of roreign publications in the experimental field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2013. V. 49. No. 2. P. 100—111.
9. *Oh T., Kee S.H., Arndt R.W., Popovics J.S., Zhu J.* Comparison of NDT methods for assessment of a concrete bridge deck // Journal of Engineering Mechanics. 2013. V. 139 (3). P. 305—314.
10. *Alani A.M., Aboutalebi M., Kilic G.* Integrated health assessment strategy using NDT for reinforced concrete bridges // NDT&E International. 2014. V. 61. P. 80—94.
11. *Breysse D.* Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods // Construction and Building Materials. 2012. V. 33. P. 139—163.
12. *Gomez-Heras M., Benavente D., Pla C., Martinez-Martinez J., Fort R., Brotons V.* Ultrasonic pulse velocity as a way of improving uniaxial compressive strength estimations from Leeb hardness measurements // Construction and Building Materials. 2020. V. 261.
13. CEN — European Committee fo Standardization / Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components. Brussels: EN 13791, 2019.
14. CEN — European Committee for Standardization / Testing concrete in structures. Part 4. Determination of ultrasonic pulse. Brussels: EN 12504-4, 2004.
15. *Bungey J.H., Millard S.G., Grantham M.G.* Testing of Concrete in Structures / 4^a ed. Nova York: Taylor & Francis, 2006.
16. *Lim M.K., Cao H.* Combining multiple NDT methods to improve testing effectiveness // Construction and Building Materials. 2013. V. 38. P. 1310—1315.
17. *Komlos K., Popovics S., Nürnberggerová T., Babál B., Popovics J.S.* Ultrasonic pulse velocity test of Concrete properties as specified in various standards // Cement and Concrete Composites. 1996. 10 Junho. V. 18.
18. *Silva F.A.N., Nogueira C.L., Silva J.A., Araújo A.V.P., Azevedo A.C., Delgado J.M.P.Q.* Ultrasonic assessment of damage in concrete under compressive and thermal loading using longitudinal and transverse waves // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. P. 808—816.
19. *Proceq S.A.* Pundit manual. Schwerzenbach: Swiss Solutions, 2017.
20. International Atomic Energy Agency, Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, Vienna: IAEA, 2002.
21. *Scott D.B.* Internal inspection of reinforced concrete for nuclear structures using shear wave tomography // Energy Conversion and Management. 2013. V. 74. P. 582—586.
22. *Birgül R.* Hilbert transformation of waveforms to determine shear wave velocity in concrete // Cement and Concrete Research. 2009. V. 39. P. 696—700.
23. *Lee Y.H., Oh T.* The measurement of P-, S-, and R-Wave velocities to evaluate the condition of reinforced and prestressed concrete slabs // Advances in Materials Science and Engineering. 2016.
24. *Sabbağ N., Uyanık O.* Prediction of reinforced concrete strength by ultrasonic velocities // Journal of Applied Geophysics. 2017. V. 141. P. 13—23.
25. *Ravindrarajah R.S.* Evaluation of compressive strength for high-strength concrete by pulse velocity method. Proceedings of sessions sponsored by the Engineering Mechanics Division of the American Society of Civil Engineers in conjunction with the Structures Congress San Antonio. Texas, 1992. P. 115—126.
26. *Elvery R.H., Ibrahim L.A.M.* Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages // Magazine of Concrete Research. 1976. V. 28. P. 181—190.
27. *Evangelista A.C.J.* Evaluation of concrete strength using different non-destructive testing methods (Translated from the portuguese — Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos), Rio de Janeiro: Dissertation (Doctorate in Civil Engineering) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.
28. *Lee T., Lee J.* Setting time and compressive strength prediction model of concrete by nondestructive ultrasonic pulse velocity testing at early age // Construction and Building Materials. V. 252.
29. European Committee for Standardization, Eurocode 2: Design of concrete structures. Brussels: EN 1992-1-1, 2010.
30. *Maia P.C. d. A., Waked L.V., Prellwitz M.F.* Estimate of Elastic Modulus of Continuous Flight Auger Concrete // Geotecnia Novembro. 2019. P. 27—40.
31. CEN — European Committee fo Standardization / Cement — Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Brussels: EN 197-1, 2011.
32. CEN — European Committee fo Standardization / Testing fresh concrete — Part 2: Slump test. Brussels: EN 12350-2, 2019.