

## ИЗМЕРЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАКТНЫХ БЕТОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ИМПАКТ-ЭХОМЕТОДА

© 2022 г. В.К. Качанов<sup>1,\*</sup>, И.В. Соколов<sup>1</sup>, А.А. Самокрутов<sup>1,2</sup>, В.П. Лунин<sup>1</sup>, С.А. Федоренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
Россия 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14

<sup>2</sup>ООО «АКС», Россия 142712 Московская обл., промзона «Технопарк», ул. Восточная, вл. 12, стр. 1

\*E-mail: kachanovvk@mail.ru

Поступила в редакцию 08.10.2021; после доработки 08.12.2021

Принята к публикации 10.12.2021

Импакт-эхометодом, являющимся методом свободных колебаний, контролируют строительные конструкции из бетона, у которых измеряемая толщина  $H$  по крайней мере в шесть раз меньше иных габаритов, и не контролируют компактные изделия, у которых толщина  $H$  сопоставима с иными габаритами. Проблема контроля компактных объектов заключается в том, что на спектре компактного изделия невозможно однозначно определить искомую резонансную частоту  $f_0 \sim 1/H$ , определяемую толщиной изделия  $H$ , на фоне близко расположенных многочисленных резонансов, определяемых иными габаритами контролируемого объекта. Другая причина заключается в том, что из-за сильного влияния геометрической дисперсии скорости звука в компактных изделиях необходимо рассчитывать коэффициент коррекции  $\beta$  для каждого нового компактного объекта контроля. В статье предлагается решение проблемы контроля компактных бетонных строительных конструкций с помощью мультипликативного импакт-эхометода, позволяющего определять искомую резонансную частоту, а также с помощью различных вариантов корреляционного импакт-эхометода, которые позволяют производить измерение скорости звука в компактных изделиях для последующего определения прочности бетона как в процессе его застывания, так и в процессе эксплуатации строительных конструкций с целью прогнозирования безаварийного срока службы зданий и сооружений.

*Ключевые слова:* импакт-эхометод, строительная конструкция из бетона, компактное изделие, коэффициент коррекции геометрической дисперсии скорости звука.

**DOI:** 10.31857/S0130308222010018

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач контроля строительных конструкций (СК) из бетона является измерение толщины СК, а также измерение скорости распространения акустических колебаний в бетоне, по которой судят о прочности бетона. Однако аномально высокое затухание ультразвука в бетоне не позволяет контролировать СК толщиной более 1,5 м с помощью ультразвуковых (УЗ) методов неразрушающего контроля [1]. Поэтому для контроля плоскопараллельных СК с толщиной 1,5 м и более используют акустические методы, основанные на анализе собственных частот: резонансный метод (метод вынужденных колебаний) или импакт-эхометод (метод свободных колебаний). В обоих случаях в бетонном изделии устанавливаются резонансные колебания, частота которых определяется толщиной изделия  $f_0 \sim 1/H$ . Так как при контроле изделий с большой толщиной частота резонанса невелика, то и ослабление акустического сигнала будет небольшим. По этой причине с помощью методов собственных частот удается контролировать СК, толщина которых достигает нескольких метров.

В настоящее время наибольшее распространение для контроля СК из бетона получил импакт-эхометод [2—5], при котором с помощью специального устройства (импактора) совершают короткий по длительности, но достаточный по силе механический удар (англ. — impact) по поверхности контролируемого изделия. Этот удар инициирует в объекте контроля (ОК) свободные акустические затухающие колебания, которые фиксируются приемным преобразователем (ПП), расположенным на небольшом расстоянии от импактора. Принятый акустический сигнал преобразуется в ПП в электрический, затем оцифровывается и поступает на устройство обработки, на выходе которого он представляется во временной и в частотной областях. Параметры ОК определяют по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ), на которой фиксируют выраженный максимум резонансной частоты  $f_0$ . В свою очередь, по максимуму оценивают толщину изделия  $H \sim 1/f_0$ .

Как известно, резонансные методы обеспечивают высокую точность измерения, и если затухание мало, то относительная погрешность измерения частоты не превышает 0,5 % [1]. Однако при использовании импакт-эхометода возникает дополнительная погрешность, из-за которой скорость акустической волны в реальных бетонных СК типа «плита» составляет примерно 96 % от скорости

продольной волны  $C_p$ , то есть реальная скорость звука в плите составляет  $C_{pp} = 0,96C_p$  [6]. Эта погрешность связана с геометрической дисперсией скорости звука [7]. Для устранения этой погрешности в ОК типа «плита» был введен эмпирический коэффициент  $\beta = 0,96$  [6, 7]. Именно поэтому при контроле плит импакт-эхометодом необходимо использовать значение скорости  $C_{pp}$ , которое в плите определяется волной Лэмба [6]:

$$C_{pp} = 2f_0H = \beta C_p, \quad (1)$$

где  $f_0$  — максимальная по амплитуде частота в спектре;  $H$  — толщина контролируемого изделия;  $\beta$  — коэффициент, корректирующий влияние геометрической дисперсии скорости звука;  $C_p$  — скорость распространения продольных акустических колебаний в бетоне, рассчитанная для бесконечного полупространства.

В свою очередь, как известно, скорость продольной звуковой волны  $C_p$  в изделиях с неограниченными размерами типа бесконечного полупространства зависит только от свойств материала [1]:

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (2)$$

где  $E$  — модуль Юнга;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $\rho$  — плотность.

Однако коэффициент коррекции  $\beta = 0,96$  считается известным и неизменным только для так называемых протяженных изделий типа «плита», у которых измеряемая толщина  $H$  много меньше иных габаритов [7, 8]. Сам термин «протяженное изделие» был впервые введен в работе [8] с целью подчеркнуть различие с «компактными изделиями», у которых измеряемая толщина  $H$  сопоставима с другими габаритами. Компактные СК с помощью традиционного импакт-эхометода в условиях реального строительства не контролируются. Это обусловлено следующими причинами. Во-первых, на спектре компактного изделия невозможно однозначно определить искомую резонансную частоту  $f_0$  на фоне близко расположенных многочисленных частотных пиков, определяемых иными габаритами [8]. Во-вторых, из-за сильного влияния геометрической дисперсии скорости звука в компактных ОК для каждого нового изделия необходимо рассчитывать свой коэффициент  $\beta$  [9]. В результате, в настоящее время импакт-эхометод активно развивается, однако развитие в основном связано с созданием новых алгоритмов обработки принимаемой информации с целью устранения стационарного влияния преобразования Фурье, применяя оконные функции или преобразования другого типа [10, 11], а также нивелированием субъективного фактора оценки результата контроля, используя автоматизированные системы и машинное обучение [12, 13]. Перечисленные же выше проблемы контроля компактных изделий не нашли своего полного решения [9, 14]. Именно по этой причине в настоящей работе ставится задача разработки исследовательской базы для импакт-эхометода контроля компактных изделий.

## ОСОБЕННОСТИ И ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ КОМПАКТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИМПАКТ-ЭХОМЕТОДОМ

Достоинством импакт-эхометода является не только возможность контролировать крупногабаритные СК толщиной свыше 1,5 м, но также простота применения, высокая производительность и относительная дешевизна устройств контроля. Именно поэтому импакт-эхометод получил распространение в развитых странах для контроля СК из бетона.

Измеренная с помощью импакт-эхометода резонансная частота  $f_0$  позволяет определять скорость акустических колебаний в реальных бетонных СК по формуле (1) при условии, что известна толщина бетонного изделия  $H$ . Если заранее известна скорость распространения продольной звуковой волны в бетоне  $C_p$ , то с помощью импакт-эхометода легко определить толщину изделия  $H$ :

$$H = \frac{C_{pp}}{2f_0} = \frac{\beta C_p}{2f_0}. \quad (3)$$

При этом, как уже отмечалось, коэффициент  $\beta$  постоянен только у протяженных изделий, а у компактных меняется в зависимости от ОК [9]. Резонансная частота  $f_0$  также однозначно измеряется только у протяженных объектов. Вместе с тем, частота  $f_0$  и коэффициент коррекции  $\beta$  достаточно просто определяются с помощью моделирования в компактных ОК с известными габари-

тами. Так, в [7] с помощью метода конечных элементов были рассчитаны резонансные частоты и значения коэффициентов коррекции для «полукомпактных» ОК, у которых толщина и ширина сопоставимы между собой, а длина много больше двух этих габаритов. В [9] же с помощью среды моделирования были рассчитаны коэффициенты  $\beta$  для более сложных по конфигурации ОК, у которых все три габарита сопоставимы между собой. Очевидно, что значения  $f_0$  и  $\beta$ , полученные с помощью моделирования, не всегда совпадают с их значениями для реального бетонного изделия, так как при моделировании не учитывается степень неоднородности структуры бетона, наличие и размеры заполнителя (зерен гравия), неровность граней изделия со сложной конфигурацией и другие особенности СК. Поэтому возникает необходимость создания экспериментальных методов определения резонансной частоты  $f_0$  и скорости звука в компактных СК.

### МНОГОКАНАЛЬНЫЙ МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ РЕЗОНАНСА ТОЛЩИНЫ В КОМПАКТНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Если в протяженном изделии искомая частота резонанса  $f_0 \sim 1/H$  определяется с помощью импакт-эхометода достаточно просто, то обнаружить искомый резонанс толщины на спектре компактного изделия не удастся из-за присутствия большого числа частотных пиков, которые обусловлены сопоставимыми по размерам габаритами [8]. При этом зачастую амплитуды многочисленных резонансных пиков сравнимы с искомой амплитудой первой моды продольной волны. Этот эффект иллюстрируется на полученных в результате моделирования спектральных характеристиках для компактных плит с квадратным сечением на рис. 1.

Чтобы оценить степень различия компактных ОК с разными габаритами, было введено понятие «коэффициент компактности», который был обозначен как  $m$ . Он определяется отношением габаритных размеров  $a = b = D$  к толщине изделия  $H$ . Для рассматриваемых на рис. 1 симметричных ОК с квадратным сечением коэффициенты  $m = D/H$  соответственно равны 5, 4 и 3.

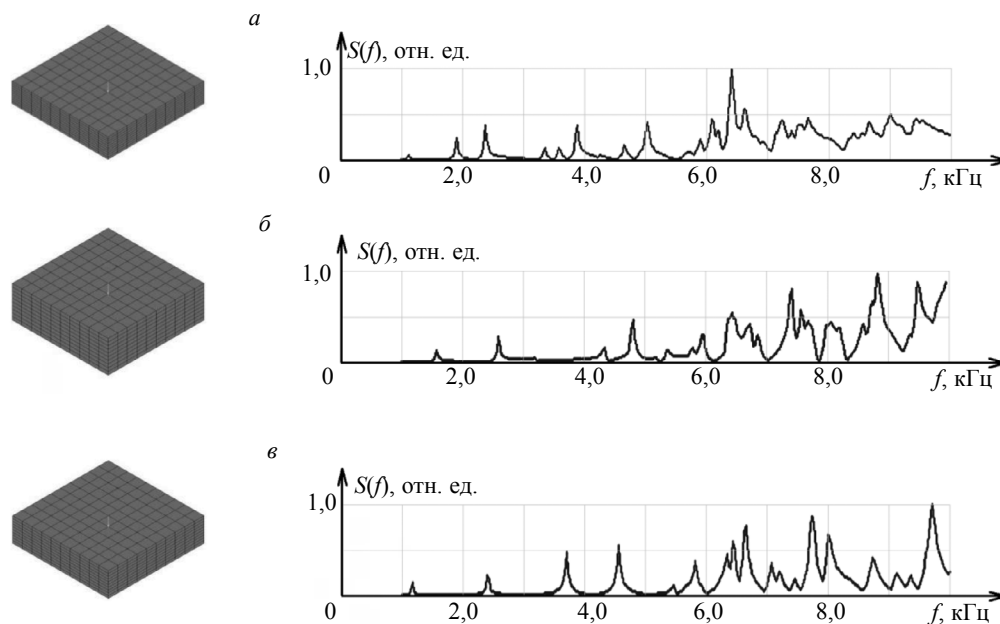


Рис. 1. Спектральные характеристики компактных плит толщиной 30 см: *a* — габариты плиты 150×150×30 см ( $m = 5$ ), частота резонанса толщины  $f_0 \approx 6425$  Гц; *б* — габариты плиты 120×120×30 см ( $m = 4$ ), частота резонанса толщины  $f_0 \approx 6500$  Гц; *в* — габариты плиты 90×90×30 см ( $m = 3$ ), частота резонанса толщины  $f_0 \approx 6650$  Гц.

На рис. 1*a* показан спектр плиты с габаритами 150×150×30 см, которую еще можно считать протяженной ( $m = 5$ ). Поэтому на АЧХ этой плиты возможно однозначно определить искомую резонансную частоту  $f_0 \sim 1/H$ . По мере уменьшения  $m$  спектральная характеристика усложняется, и уже при  $m = 4$  (рис. 1*б*) довольно сложно однозначно выделить частоту первой моды продольной волны, по которой следует определять толщину компактного изделия. При  $m \leq 3$ , как это видно из

рис. 1в, однозначная интерпретация спектра вообще становится невозможной, растет вероятность ошибки при нахождении частоты резонанса первой моды продольной волны, что снижает достоверность результатов измерения. Тем самым результаты моделирования подтверждают невозможность достоверно определять искомую частоту резонанса толщины и определять коэффициент коррекции  $\beta$  в компактных СК, у которых  $m < 5$ .

Для решения проблемы однозначного определения искомой частоты резонанса  $f_0$  в реальных бетонных компактных СК нами был предложен многоканальный мультипликативный метод (патент РФ на изобретение № 2354932), предполагающий, что контроль должен быть проведен в нескольких точках на поверхности СК с запоминанием результатов в памяти измерительного прибора с последующим перемножением парциальных АЧХ. Так как пик первой моды продольной волны присутствует на всех парциальных спектрах компактных изделий и местоположение этого пика неизменно, а амплитуды других пиков меняются в зависимости от положения ПП на поверхности СК, то перемножение спектральных характеристик приводит к выделению пика искомого резонанса и к подавлению прочих частотных пиков.

На рис. 2 приведен пример реализации мультипликативного метода определения резонансной частоты в компактном ОК с габаритами  $40 \times 40 \times 30$  см. На рис. 2а–в показаны полученные с помощью моделирования спектральные характеристики ОК для трех положений ПП, расположенных на поверхности модельного блока вблизи осей симметрии, а также главной диагонали.

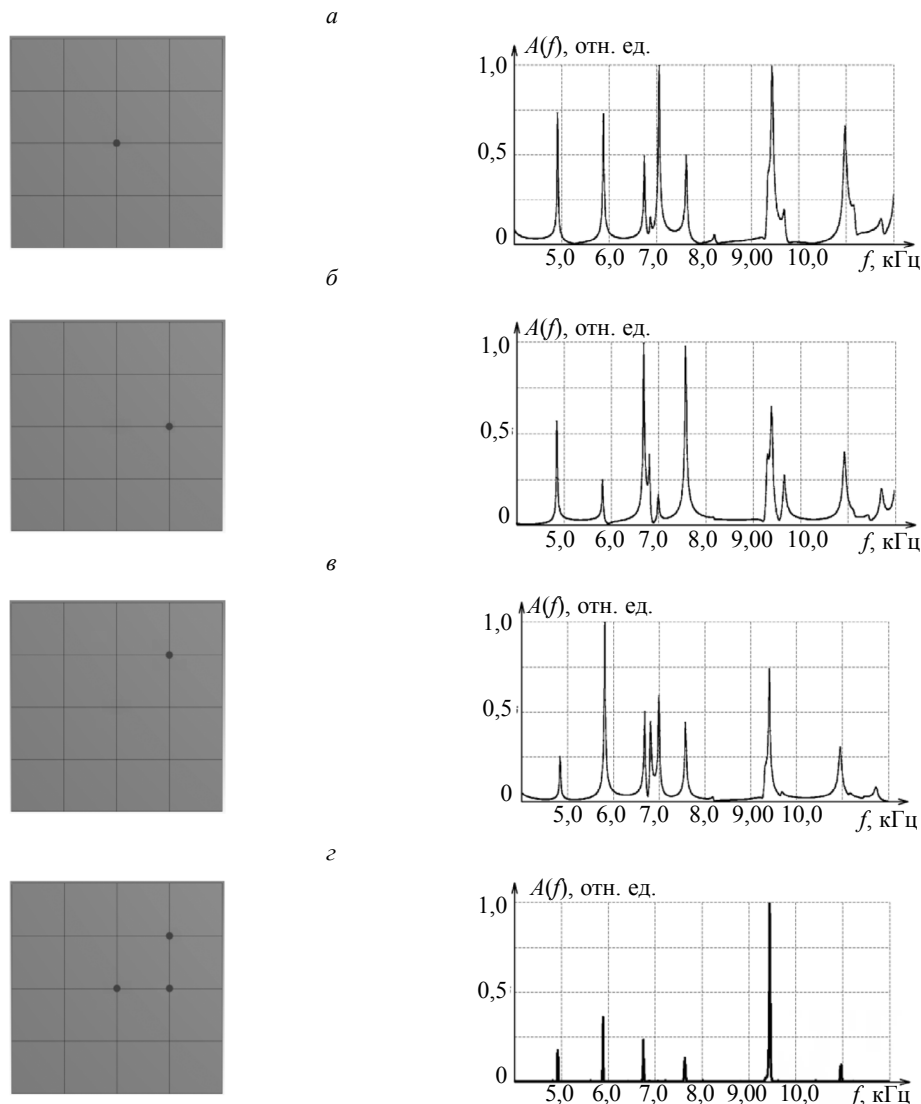


Рис. 2. Результат моделирования мультипликативного метода контроля компактного бетонного блока с габаритами  $40 \times 40 \times 30$  см при различных положениях ПП (а–в), а также результат их перемножения (г).

Как видно из рисунков, однозначная интерпретация спектра в случае одного измерения невозможна, однако после перемножения этих парциальных характеристик на итоговом спектре (рис. 2г) четко фиксируется резонансный пик, соответствующий искомой толщине компактного изделия.

Если для снятия экспериментальных АЧХ используется импакт-эхометод контроля, то такой многоканальный метод называется мультипликативным импакт-эхометодом. Если используется резонансный метод, то такой метод называется соответственно резонансно-мультипликативным методом.

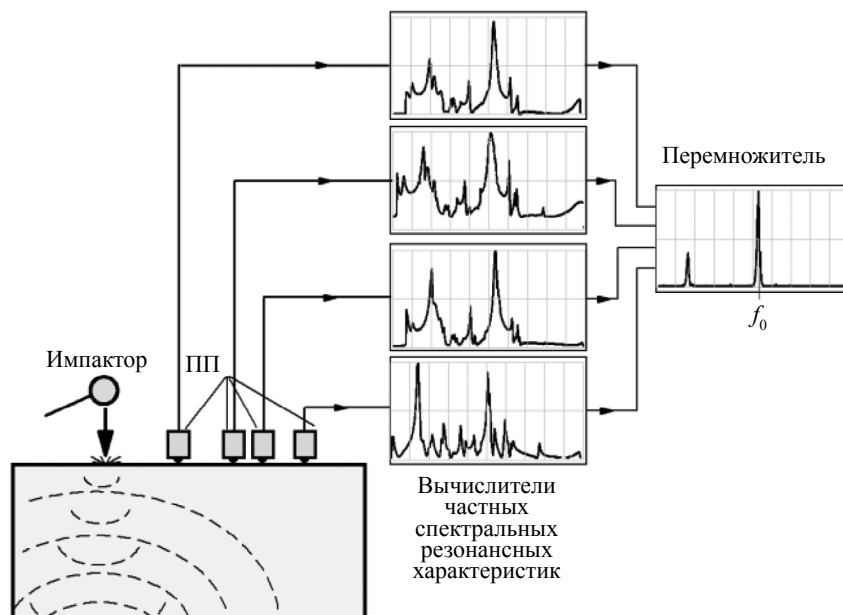


Рис. 3. Схема резонансно-мультипликативного метода контроля компактного объекта.

Схема, иллюстрирующая резонансно-мультипликативный метод контроля компактных изделий из бетона с помощью четырех ПП, изображена на рис. 3. Там же показаны полученные экспериментально при разных положениях ПП спектры на входе перемножителя и АЧХ изделия после перемножения парциальных спектров, на которой однозначно определяется искомая резонансная частота  $f_0 \sim 1/H$ .

Особенностью и достоинством предложенного мультипликативного метода определения резонансной частоты является возможность его применения в плоскопараллельных компактных бетонных изделиях с произвольной конфигурацией.

### КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В КОМПАКТНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Нахождение искомой резонансной частоты  $f_0$  на спектре компактного изделия с помощью мультипликативного импакт-эхометода частично решает проблему контроля компактных СК, так как теперь становится возможным определить скорость акустических колебаний  $C_{pp} = 2f_0H$  в компактных изделиях с большой толщиной  $H$ . Это, в свою очередь, позволяет решить задачу определения прочности бетона по скорости звука (ГОСТ 17624—2012) как в процессе изготовления крупногабаритных компактных СК из бетона, так и в процессе эксплуатации строительных сооружений с целью прогнозирования безаварийного срока службы зданий.

Однако в некоторых случаях при контроле реальных компактных бетонных изделий со сложной структурой и с нестандартной конфигурацией точность определения резонансной частоты  $f_0$  с помощью мультипликативного метода может оказаться недостаточно высокой. Поэтому нами был разработан еще один способ экспериментального определения скорости  $C_{pp}$  в сложных по форме

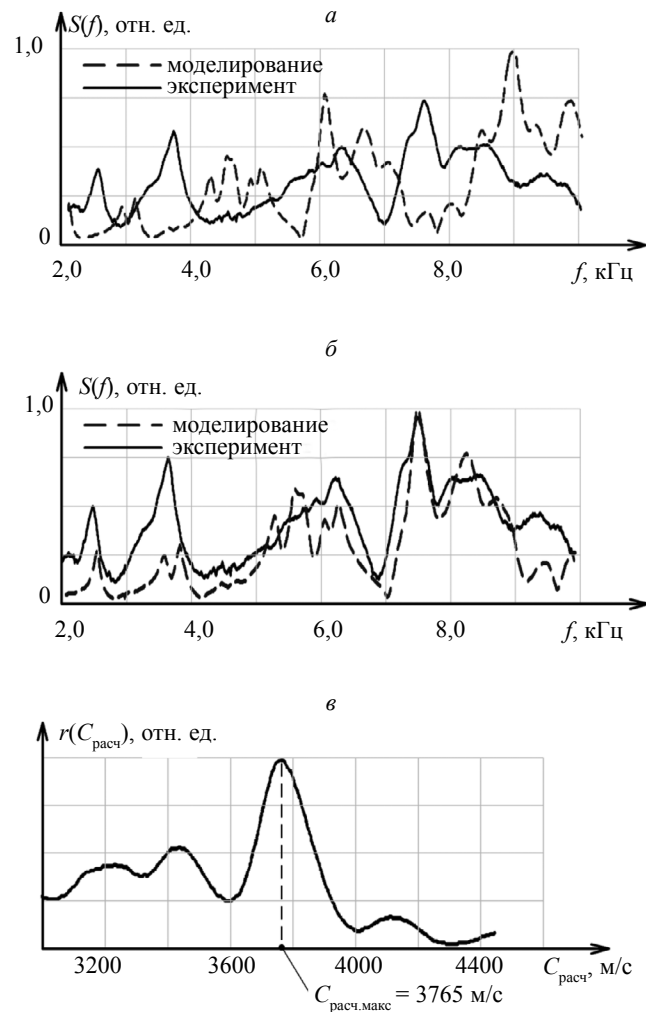


Рис. 4. Спектральные характеристики бетонного блока  $80 \times 50 \times 30$  см: эксперимент (а, б: сплошная линия), расчет для скорости 3000 м/с (а: штриховая линия), расчет с наибольшей корреляцией (б: штриховая линия). Зависимость значения взаимной корреляции от расчетной скорости акустических колебаний в бетонном блоке (в).

компактных бетонных СК, все размеры которых известны (патент РФ на изобретение № 2397487). Суть этого способа поясняется на примере контроля несимметричного бетонного блока с габаритами  $80 \times 50 \times 30$  см. Сначала с помощью одного из методов собственных частот снимается экспериментальная спектральная характеристика компактного бетонного блока (рис. 4а, сплошная линия), по которой достаточно трудно установить искомый резонанс на частоте  $f_0 \approx 7500$  кГц. Затем с помощью моделирования рассчитывается АЧХ этого же изделия (рис. 4а, штриховая линия) при произвольно выбранном значении расчетной скорости звука  $C_{расч} = 3000$  м/с, при которой расчетная АЧХ не совпадает с экспериментальной. Если бы значение взятой для расчета скорости продольных колебаний  $C_{расч}$  соответствовало реальной скорости звука в компактном изделии  $C_{pp}$ , то расчетная и экспериментальная АЧХ совпали бы, что позволило бы определить точное значение скорости распространения акустической волны  $C_{pp}$  в компактном изделии из бетона. Поэтому на следующем этапе производится компьютерное вычисление набора расчетных АЧХ при различных значениях расчетной скорости посредством масштабирования исходной расчетной характеристики по оси частот в ожидаемом диапазоне скоростей (в данном примере от 2000 до 5000 м/с) с шагом 10 м/с. Так, например, для того, чтобы получить характеристики, соответствующие скоростям 3000, 3010, 3020, 3030 м/с, необходимо умножить частотную ось исходной характеристики на коэффициенты 1, 1,0033, 1,0066, 1,0100 соответственно. Затем среди всех расчетных АЧХ находится та расчетная характеристика, которая наиболее схожа с экспериментальной (рис. 4б, штриховая линия). По ней и определяется скорость звука в бетоне  $C_{pp} \approx 3765$  м/с.

Для более точного определения степени совпадения экспериментальной и расчетных характеристик с помощью специальной программы вычисляется коэффициент взаимной корреляции  $r$  экспериментальной АЧХ и всех расчетных, построенных для разных значений скорости  $C_{\text{расч}}$ . Далее определяется максимум рассчитанной корреляционной характеристики  $r(C_{\text{расч}})$ , по которому находится искомая скорость продольной звуковой волны (рис. 4в). В данном компактном бетонном блоке  $C_{\text{расч макс}} = 3765$  м/с.

Таким образом, предложенный корреляционный метод позволяет измерять скорость продольной акустической волны в компактных изделиях произвольной формы. Причем измерение скорости ведется во всем объеме СК, а не на каком-либо участке и, тем более, не на поверхности. При этом в корреляционном методе нет принципиальных ограничений на максимальную толщину изделия. К недостаткам данного метода можно отнести то, что для измерения скорости необходимо знать все размеры контролируемого изделия и с помощью моделирования проводить расчет АЧХ для каждого нового компактного объекта.

### КОРРЕЛЯЦИОННО-МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫЙ ИМПАКТ-ЭХОМЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В КОМПАКТНЫХ БЕТОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

К сожалению, в некоторых компактных бетонных изделиях не всегда удается однозначно определить максимум на корреляционной характеристике  $r(C_{\text{расч}})$  из-за того, что при моделировании не учитываются особенности структуры бетона и возможные неровности поверхностей контролируемых СК. Поэтому для повышения точности измерения скорости звука в бетоне нами был предложен корреляционно-мультипликативный метод измерения скорости, при котором с помощью импакт-эхометода определяются экспериментальные АЧХ, полученные в различных точках на поверхности изделия, с вычислением корреляционной характеристики  $r(C_{\text{расч}})$  для каждого положения датчика парциальной и с последующим перемножением набора парциальных корреляционных зависимостей [14].

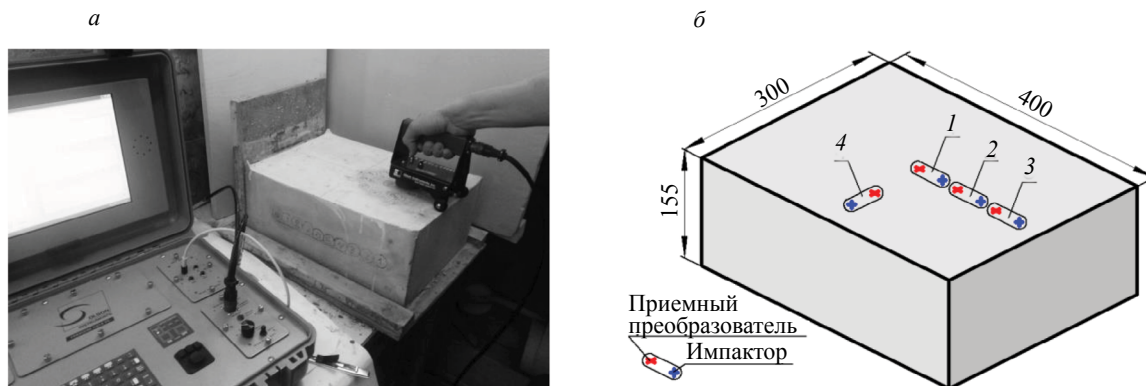


Рис. 5. Контроль бетонного блока аппаратурой, реализующей импакт-эхометод (а). Схема расположения импактора и ПП на поверхности блока (б).

На рис. 5 показан пример контроля компактного несимметричного бетонного блока размером  $40 \times 30 \times 15$  см, выполненного из бетона с наполнителем относительно большого размера (средний диаметр частиц гравия около 20 мм). Вследствие наличия крупного наполнителя по корреляционной характеристике  $r(C_{\text{расч}})$  достаточно сложно однозначно определить скорость звука в бетоне. Поэтому при контроле этого блока использовался корреляционно-мультипликативный импакт-эхометод измерения скорости. С этой целью с помощью аппаратуры Olson Instruments (рис. 5а), реализующей импакт-эхометод, снимались спектральные характеристики в четырех точках на поверхности блока (рис. 5б). Для этих же точек с помощью моделирования были построены АЧХ изделия и были вычислены функции взаимной корреляции  $r(C_{\text{расч}})$  между экспериментальными и расчетными спектральными характеристиками. На рис. 6а показаны четыре зависимости  $r(C_{\text{расч}})$  для четырех точек на поверхности контролируемого бетонного блока. Из графиков видно, что у всех корреляционных зависимостей положение максимумов различается, что позволяет определить

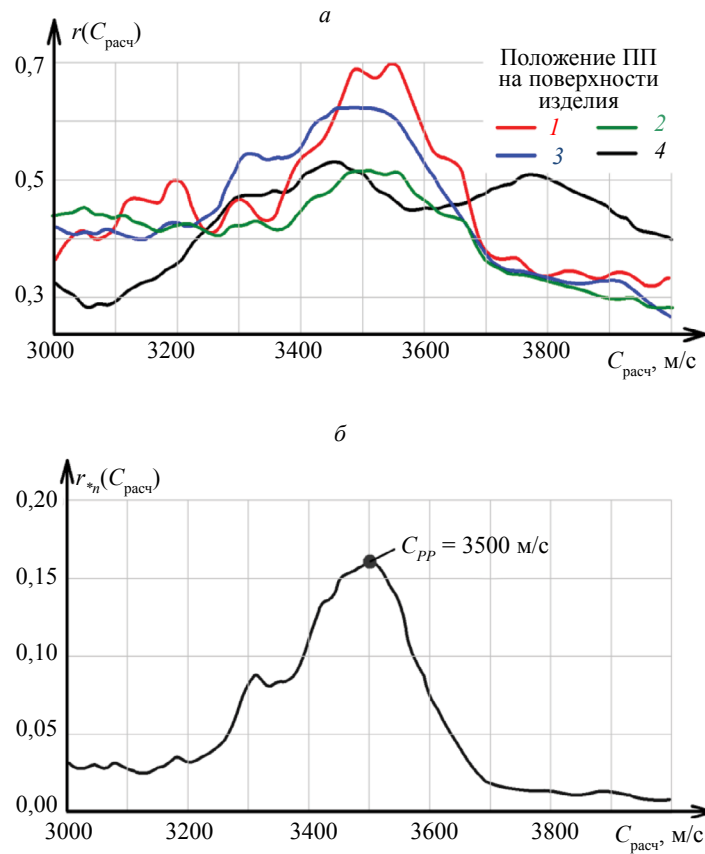


Рис. 6. Зависимости значения коэффициента взаимной корреляции расчетных и экспериментальных АЧХ от скорости акустических колебаний для четырех положений датчиков на поверхности контролируемого блока (а), а также результат их перемножения (б).

только приблизительное значение скорости в изделии. Для повышения точности измерения была проведена мультипликативная обработка парциальных корреляционных зависимостей. Результирующая характеристика (рис. 6б) имеет один ярко выраженный максимум, по которому однозначно определяется значение скорости звуковой волны  $C_{PP}$  в бетоне:  $C_{PP} = 3500$  м/с.

В дополнении к этому был проведен сравнительный эксперимент измерения скорости звука в бетонном блоке размером  $40 \times 40 \times 30$  см в процессе его формирования предлагаемым корреляционно-мультипликативным методом и стандартизированным (ГОСТ 17624—2012) ультразвуковым теневым методом. При этом с помощью корреляционно-мультипликативного метода рассчитывается скорость  $C_{PP} = \beta C_p$ , а с помощью теневого измерения, проведенного в нашем случае на частоте 100 кГц, именно скорость продольной звуковой волны  $C_p$ . Таким образом, чтобы сопоставить полученные разными методами значения скоростей нужно скорость  $C_{PP}$  разделить на соответствующий блоку  $40 \times 40 \times 30$  см корректирующий коэффициент  $\beta$ , компенсирующий влияние геометрической дисперсии. Для данного блока  $\beta \approx 1,41$ , а скорость  $C_{PP}$  определяется волной Лэмба [9]. На рис. 7 показана совокупность характеристик  $r(C_{расч}^*)$ , полученных описанным выше корреляционно-мультипликативным методом в различные дни в процессе формирования бетонного блока, где скорость  $C_{расч}^*$  представляет собой приведенное к коэффициенту  $\beta$  значение. Данная зависимость отражает тенденцию набора прочности контролируемого бетонного блока при его затвердевании, что выражается в росте измеряемой в нем скорости звука. В свою очередь, по максимумам парциальных характеристик  $r(C_{расч}^*)$  была определена зависимость изменения скорости продольной звуковой волны  $C_p$  в изделии от времени формирования бетона (линия 2 графика, показанного на рис. 8). Также на графике представлена зависимость, полученная в результате измерений методом сквозного прозвучивания, или ультразвуковым теневым методом (линия 1 графика, показанного на рис. 8). Результаты измерения различными методами совпадают, что подтверждает правильность предложенного



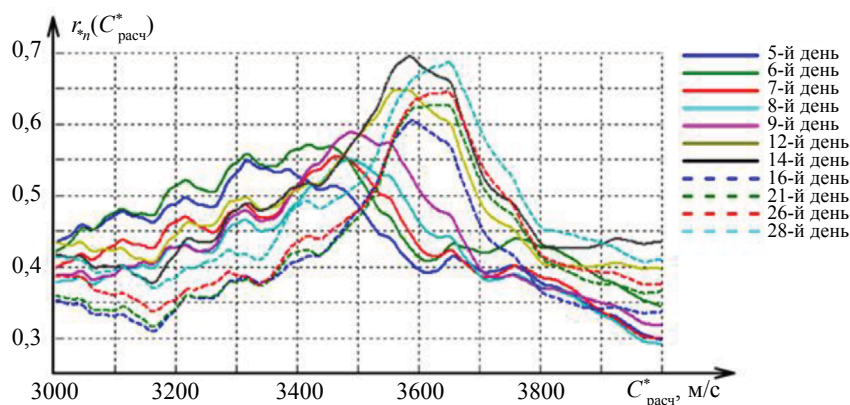


Рис. 7. Мультипликативно-корреляционные характеристики, полученные в различные дни в процессе формирования бетонного блока в ходе сравнительного эксперимента.

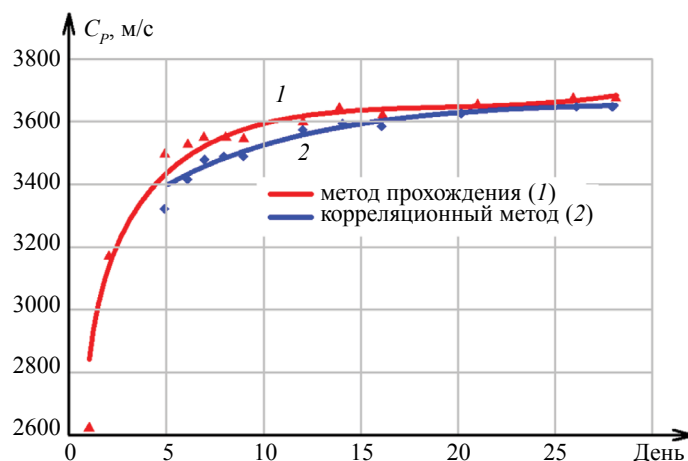


Рис. 8. Сравнение результатов определения скорости продольной звуковой волны корреляционно-мультипликативным импакт-эхометодом и методом сквозного прозвучивания.

корреляционно-мультипликативного импакт-эхометода измерения скорости, позволяющего повысить точность определения прочности бетона в крупногабаритных компактных строительных конструкциях.

## ВЫВОДЫ

УЗ методы контроля не позволяют проводить измерения СК из бетона толщиной более 1,5 м вследствие высокого затухания ультразвука. Для контроля таких объектов нужно использовать акустические методы, основанные на анализе собственных частот контролируемого изделия: резонансный метод и рассматриваемый в статье импакт-эхометод. Основная погрешность импакт-эхометода связана с геометрической дисперсией скорости звука, которая компенсируется корректирующим коэффициентом  $\beta$ . При этом его значение известно и постоянно только для протяженных изделий типа «плита», у которых измеряемая толщина много меньше других габаритов. ОК, чьи габариты сопоставимы друг с другом, называемые компактными изделиями, в условиях реального строительства импакт-эхометодом не контролируются. Это обусловлено неоднозначностью АЧХ, когда на фоне множественных частотных пиков не удается выделить искомый резонанс толщины, а также сильным влиянием геометрической дисперсии вследствие которого для каждого нового компактного изделия необходимо рассчитывать свой собственный коэффициент  $\beta$ .

В статье предлагаются несколько способов решения обозначенных проблем контроля компактных изделий. Так, описанный мультипликативный импакт-эхометод позволяет экспериментальным путем в производственных условиях определять частоту резонанса толщины в компактных бетонных изделиях произвольной формы. Разработанный корреляционный метод измерения скорости акустических колебаний позволяет решить задачу определения прочности бетона по измеренной скорости как в процессе изготовления крупногабаритных компактных СК, так и в процессе эксплуатации зданий и сооружений с целью прогнозирования безаварийного срока службы. Кроме того, при необходимости возможно применение предложенного в статье корреляционно-мультипликативного импакт-эхометода измерения скорости звука.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
2. *Geetha, Praveen Kumar*. Thickness estimation and crack detection in concrete using impact-echo technique // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2018. V. 5. P. 2345—2348.
3. *Montiel-Zafra V., Canadas-Quesada F., Campos-Sunol M.J., Vera-Candeas P., Ruiz-Reyes N.* Monitoring the internal quality of ornamental stone using impact-echo testing // *Applied Acoustics*. 2019. V. 155. P. 180—189.
4. *Dorafshian S., Azari H.* Deep Learning Models for Bridge Deck Evaluation Using Impact Echo // *Construction and Building Materials*. 2020. V. 263.
5. *Coleman Z., Schindler A., Jetzel C.* Impact-Echo Defect Detection in Reinforced Concrete Bridge Decks without Overlays // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2021. V. 35.
6. *Carino N.J.* Impact-echo: the fundamentals // *International Symposium on NDT in Civil Engineering*. 2015. P. 1—18.
7. *Sansalone M., Streett W.B.* Impact-echo: nondestructive testing of concrete and masonry. Bullbrier Press, Jersey Shore, PA. 1997. 339 p.
8. *Качанов В.К., Соколов И.В., Авраменко С.Л.* Проблемы акустического контроля крупногабаритных строительных конструкций из бетона // *Дефектоскопия*. 2008. № 12. С. 12—22.
9. *Kachanov V.K., Sokolov I.V., Fedorenko S.A.* Procedure for Determining the Factor of Correction for Geometric Dispersion of Speed of Sound in Compact Concrete Products // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. P. 299 [Качанов В.К., Соколов И.В., Федоренко С.А. Методика определения коэффициента коррекции геометрической дисперсии скорости звука для компактных изделий из бетона // *Дефектоскопия*. 2020. № 4. С. 3—13.]
10. *Xu J., Ren Q., Shen Z.* Analysis Method of Impact-Echo Based on Variational Mode Decomposition // *Journal of Vibroengineering*. 2018. V. 20. P. 2593—2603.
11. *Ni T., Li J.* ННТ-based CEEMD to Improve an Impact-Echo Test // *Journal of Testing and Evaluation*. 2019. V. 47.
12. *Chou H.* Concrete Object Anomaly Detection Using a Nondestructive Automatic Oscillating Impact-Echo Device // *Applied Sciences*. 2019. V. 9.
13. *Sengupta A., Guler S., Shokouhi P.* Interpreting Impact Echo Data to Predict Condition Rating of Concrete Bridge Decks: A Machine-Learning Approach // *Journal of Bridge Engineering*. 2021. V. 26.
14. *Kachanov V.K., Sokolov I.V., Kontsov R.V., Lebedev S.V., Fedorenko S.A.* Ultrasonic wave velocity measurement in concrete using the impact-echo method // *Insight — Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2019. V. 61. No. 1. P. 15—19.