

ПОСТРОЕНИЕ ДИСПЕРСИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО КОЭФФИЦИЕНТА ПРИ КОНТРОЛЕ КОМПАКТНЫХ ИЗДЕЛИЙ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ ИМПАКТ-ЭХОМЕТОДОМ

© 2021 г. В.К. Качанов^{1,*}, И.В. Соколов¹, А.А. Самокрутов^{1,2}, В.Г. Шевалдыкин², С.А. Федоренко², С.Г. Алехин², А.В. Козлов², Н.К. Пичугин²

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14

²ООО «АКС», Россия 142712 Московская область, промзона «Технопарк», ул. Восточная, вл. 12, стр. 1

*E-mail: kachanovvk@mail.ru

Поступила в редакцию 20.09.2020; после доработки 13.11.2020

Принята к публикации 24.11.2020

Приведены результаты вычисления коэффициента коррекции геометрической дисперсии скорости звука β в компактных изделиях квадратного сечения при различных отношениях толщины к стороне сечения. С помощью моделирования в программной среде ANSYS показано, что по мере увеличения данного отношения происходит трансформация основного вида колебаний, обуславливающего собственный резонанс в компактном изделии: от продольных волн в компактных изделиях типа «свая» к волнам Лэмба в компактных изделиях типа «плита». При этом в компактных изделиях происходит нелинейное изменение коэффициента β , позволяющего скорректировать эффект геометрической дисперсии. Рассчитана дисперсионная зависимость коэффициента β в компактных объектах квадратного поперечного сечения от различного соотношения толщины и стороны сечения изделия.

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

DOI: 10.31857/S0130308221010012

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, при контроле строительных конструкций (СК) из бетона с помощью импакт-эхометода [1] возникает геометрическая дисперсия скорости звука [2], приводящая к появлению погрешности в значении измеряемой толщины изделия H (или в значении измеряемой скорости акустических колебаний C). Эта погрешность компенсируется с помощью коэффициента коррекции геометрической дисперсии скорости звука β , значение которого подставляется в основную расчетную формулу импакт-эхометода [1]:

$$H = \frac{\beta C_l}{2f_p}, \quad (1)$$

где H — измеряемая толщина изделия; C_l — скорость распространения продольных акустических колебаний в бетоне, рассчитанная для бесконечного полупространства; f_p — частота спектральной составляющей с максимальной амплитудой (основная резонансная частота).

Коэффициент коррекции β имеет неизменное значение для протяженных объектов контроля: для изделий типа «плита» (стена, перекрытие, фундамент здания), у которых толщина H много меньше иных габаритов a и b , $\beta \approx 0,96$ (ASTM C1383—15), а также для изделий типа «свая» (колонна, опора ЛЭП, забивная свая), у которых измеряемая длина H много больше размеров сечения a и b , $\beta \approx 0,95$ [1]. Именно поэтому за рубежом такие протяженные СК активно контролируются с помощью импакт-эхометода как на стадии строительства, так и в процессе эксплуатации зданий и сооружений [3—5].

Однако наряду с протяженными СК, у которых значение коэффициента коррекции β неизменно, имеется большое число так называемых компактных СК, у которых все размеры H , a и b сопоставимы (фундаментные блоки, опоры мостов, тестовые кубические изделия, по которым определяют прочность бетона при его застывании). В таких компактных объектах контроля (ОК) коэффициент коррекции имеет свое индивидуальное значение для каждого нового изделия (для каждого соотношения толщины H и иных габаритов a и b). Другая проблема, ограничивающая применение импакт-эхометода для контроля компактных СК, заключается в том, что в них не удается однозначно установить частоту искомого резонанса f_p на фоне близко расположенных других резонансных пиков. По этим причинам компактные ОК не контролируются с помощью импакт-эхометода. Так, на сегодняшний день есть совсем немного работ, где делается попытка контроля не протяженных изделий определенной формы [6—9]. При этом отсутствует достаточная исследовательская база, которая бы описывала особенности контроля импакт-эхометодом компактных объектов в целом.

В [10, 11] были впервые поставлены и частично решены проблемы контроля компактных бетонных изделий. В частности, в [11] был предложен многоканальный мультипликативный импакт-эхометод измерения толщины H компактных изделий, позволяющий однозначно определять частоту искомого резонанса f_p , основанный на измерении нескольких АЧХ изделия в нескольких положениях приемника на поверхности ОК и последующем перемножении результатов измерения. В [12] приведены результаты исследований последних лет по использованию импакт-эхометода для контроля наиболее часто применяемых в строительстве компактных изделий с квадратным сечением (стены, сваи, балки, тестовые бетонные изделия кубической формы). В частности, в [12] были разработаны теоретическая и экспериментальная методики расчета коэффициента β для компактных СК с квадратным сечением (со стороной квадрата $a = b = D$). В этих методиках использовали моделирование волновых процессов в программной среде ANSYS, а также предложенный нами мультипликативный метод моделирования в компактных ОК.

Результаты теоретического расчета были подтверждены экспериментальными измерениями. Так, для компактного изделия толщиной H с габаритным коэффициентом $g = D/H = 1,25$ был рассчитан коэффициент коррекции $\beta \approx 0,77$. Для этого же изделия было установлено, что основная резонансная частота f_p обусловлена симметричной модой волны Лэмба, а само изделие относится к компактному ОК типа «плита».

При этом расчет коэффициента β для компактных ОК показал, что коэффициент коррекции имеет различные значения в компактных изделиях с разными габаритными коэффициентами g . Кроме того, на основе анализа дисперсионной зависимости скорости звука от габаритного коэффициента в [12] было показано, что резонансные пики на спектре компактных изделий, частоты которых определяются габаритами H , a и b , отражают различные типы колебаний, что требует определения типа колебания соответствующего основной резонансной частоте f_p для каждого конкретного компактного ОК. По этой причине интерес представляет построение дисперсионной зависимости $\beta(g)$ для всего спектра компактных изделий квадратного сечения, такую дисперсионную зависимость следует найти для компактных ОК с различными значениями габаритного коэффициента g , имеющих один и тот же тип колебаний.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА β ОТ РАЗЛИЧНЫХ ГАБАРИТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ В КОМПАКТНЫХ ИЗДЕЛИЯХ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

Разработанная в [12] методика расчета коэффициента коррекции β в компактных изделиях была использована для построения зависимости $\beta(g)$ для набора СК с квадратным сечением с одинаковой толщиной $H = 0,3$ м и с различными габаритными коэффициентами $g = D/H$ (табл. 1). В этих СК габаритный коэффициент g возрастал за счет увеличения стороны сечения D от $g = 1/3$ (протяженная свая, у которой измеряемая длина H в три раза больше D) до компактного изделия с габаритным коэффициентом $g = 1$ (куб), затем до компактного изделия типа «плита» ($g = 2$) и, наконец, до протяженной плиты, у которой измеряемая толщина H в шесть раз меньше стороны квадрата D ($g = 6$).

Ниже приведена процедура построения зависимости $\beta(g)$ с помощью моделирования в программной среде ANSYS. При этом расчет β для каждого изделия был произведен исходя из того, что все ОК выполнены из бетона марки М300, которая широко используется в строительстве и у которой плотность $\rho = 2400$ кг/м³, модуль Юнга $E = 34,56$ ГПа и коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$. Зная данные характеристики, можно рассчитать значение скорости распространения продольной звуковой волны C_l в моделируемом бетоне по формуле для бесконечного полупространства [13]:

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

которое составит $C_l = 4000$ м/с.

В [12] было показано, что при теоретическом методе определения коэффициента коррекции значение β находится как отношение резонансной частоты f_{ans} , полученной с помощью гармонического анализа в программной среде ANSYS, к теоретическому значению резонансной частоты f_p (при $\beta = 1$). Значение резонансной частоты f_p рассчитывалось из формулы (1). Для объекта контроля из бетона марки М300 с толщиной $H = 0,3$ м оно составляет $f_p \approx 6667$ Гц.

Значение резонансной частоты f_{ans} находили по спектру изделия, полученному с помощью гармонического анализа. Причем на спектре протяженных ОК эта частота всегда определялась одно-

Таблица 1

Исследуемые объекты для построения зависимости $\beta(g)$

Размер стороны сечения D , мм	Габаритный коэффициент g
100	1/3
150	0,5
200	0,67
250	0,83
300	1
350	1,17
375	1,25
400	1,33
450	1,5
600	2
750	2,5
900	3
1200	4
1800	6

значно, а на спектре ряда компактных ОК для вычисления частоты f_{ans} использовали мультипликативную многоканальную методику моделирования, при которой виртуальное измерение компактного изделия проводили в нескольких положениях виртуального приемника на поверхности ОК, а затем результаты парциальных измерений перемножали. Далее устанавливали значение коэффициента коррекции $\beta = f_{\text{ans}} / f_p$ для каждого конкретного ОК с конкретным значением габаритного коэффициента g и осуществляли построение зависимости $\beta(g)$.

Здесь следует отметить, что впервые построение дисперсионной зависимости $\beta(g)$ для компактных ОК было проведено в работе [11]. Однако при этом не учитывалось, что в компактных изделиях наблюдается смена типов резонансного колебания. Также не учитывалось, что следует определять момент смены типа колебаний, а зависимость $\beta(g)$ следует строить отдельно для каждого набора значений габаритного коэффициента g , у которого превалирует (то есть определяет резонанс измеряемого габарита) тот или иной тип колебаний. Поэтому приведенные значения коэффициента коррекции β для компактных изделий типа «плита», а также построенные в [11] дисперсионные зависимости для коэффициента коррекции β не точны.

Превалирующий тип колебаний в каждом конкретном компактном изделии можно установить с помощью модального представления результатов моделирования. Основным критерием при этом служит следующий признак: у изделий типа «свая» резонанс измеряемого габарита (длины) обусловлен стержневой волной, являющейся частным случаем продольной волны (рис. 1а) [1], а у изделий типа «плита» резонанс толщины обусловлен волной Лэмба (рис. 1б) (ASTM C1383—15).

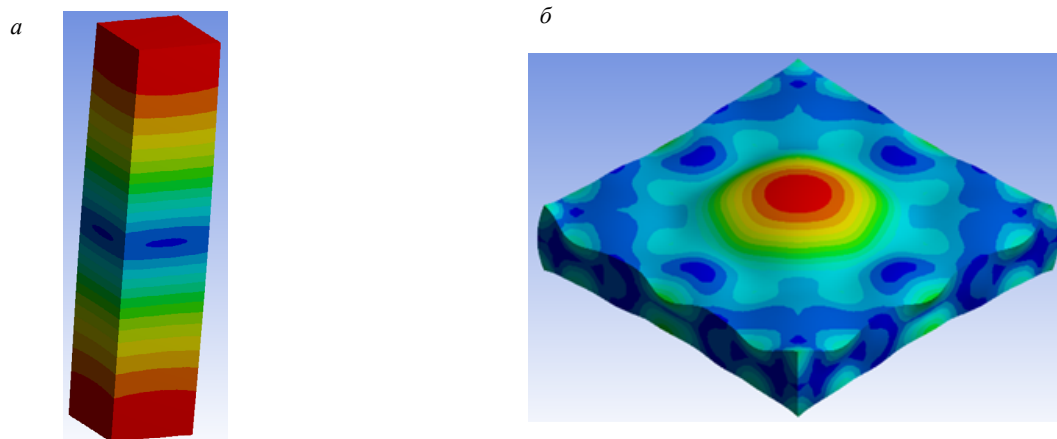


Рис. 1. Визуализация резонанса измеряемого габарита в программе ANSYS:
а — свая; б — плита.

По этой причине в предлагаемой ниже методике построения дисперсионной зависимости $\beta(g)$ для компактных изделий сперва, если это необходимо, с помощью мультипликативного метода моделирования находится частота f_{ans} , а затем с помощью модального представления результатов моделирования определяется преобладающий тип колебаний. Зависимость $\beta(g)$ строится для каждого набора компактных ОК, у которого преобладает тот или иной тип колебаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА β ОТ ГАБАРИТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА В КОМПАКТНОЙ ОБЛАСТИ СВАИ

Построение зависимости $\beta(g)$ начнем с протяженной сваи с габаритным коэффициентом $g = 1/3$. На АЧХ сваи (рис. 2а), полученной с помощью гармонического анализа, виден ярко выраженный максимум, который соответствует резонансной частоте $f_{\text{ans}} \approx 6300$ Гц. Модальное представление колебательного процесса сваи для этой резонансной частоты подтверждает наличие в ней продольного колебания. Значение корректирующего коэффициента для исследуемого изделия $\beta = f_{\text{ans}} / f_p = 6300 / 6667 \approx 0,945$, что близко к значению коэффициента β для протяженного ОК типа «свая» [1].

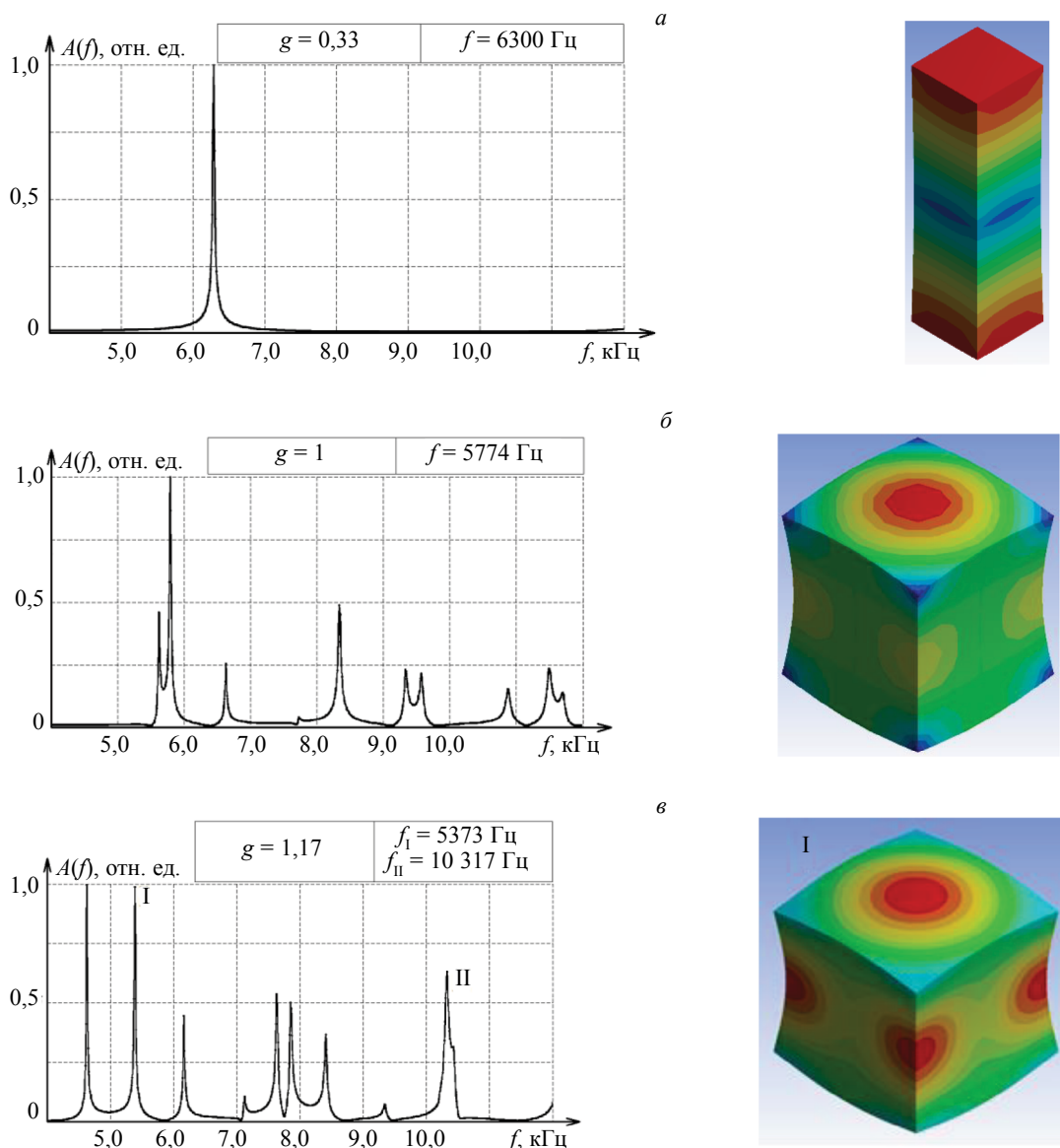


Рис. 2. Спектральное (слева) и модальное (справа) представления объектов контроля с квадратным сечением с габаритными коэффициентами g , равными: $1/3$ (а), 1 (б) и 1,17 (в).

Далее, увеличивая габаритный коэффициент g , мы переходим к компактным сваям. Для ОК $g = 0,5$ частота резонанса немного снизилась и равна $f_{\text{ans}} \approx 6262$ Гц, а корректирующий коэффициент составляет $\beta \approx 0,939$.

Для ОК с габаритным коэффициентом $g = 1$ (для куба) частота резонанса еще больше понизилась $f_{\text{ans}} \approx 5774$ Гц; $\beta \approx 0,866$ (см. рис. 2б).

Таким образом, по мере увеличения габаритного коэффициента g , происходит уменьшение частоты резонанса f_{ans} , причем для ОК со значениями g между $1/3$ и $0,5$ частотный резонанс f_{ans} уменьшается незначительно по сравнению со следующим объектом моделирования — кубом ($g = 1$), у которого резонансная частота $f_{\text{ans}} \approx 5774$ Гц заметно сместилась в низкочастотную область (см. рис. 2б). АЧХ куба стала более «изрезанной», но модальное представление колебаний показывает, что в кубе превалирует тот же вид продольных колебаний, что и у сваи с габаритным коэффициентом $g = 1/3$. Однако за счет того, что длина сваи становится сопоставимой с поперечным сечением сваи, интенсивность продольного колебания снижается (красный круг на поверхности модального представления для куба занимает лишь часть поверхности).

На АЧХ компактного ОК с габаритным коэффициентом $g = 1,17$ резонансная частота определяется неоднозначно, так как присутствуют два сопоставимых по величине амплитуды пика на частотах приблизительно 5373 и 4600 Гц. Поэтому для однозначного определения основной резонансной частоты был использован мультипликативный метод моделирования, который определил истинную частоту $f_{\text{ans}} \approx 5373$ Гц. Именно для этой частоты продольных колебаний был рассчитан коэффициент коррекции $\beta \approx 0,806$ (рис. 2в).

Мультипликативный метод моделирования использовался также для определения основной резонансной частоты компактного ОК с габаритным коэффициентом $g = 1,25$ (рис. 3). В этом изделии также сложно однозначно определить искомую резонансную частоту (рис. 3а), так как на АЧХ присутствуют как минимум четыре резонансных пика с сопоставимыми амплитудами. Однако после мультипликативной обработки (при которой были получены спектры ОК при расположении виртуального приемника в трех точках на поверхности ОК с последующим перемножением результатов парциальных измерений) оказалось (рис. 3б), что основным резонансным пиком с максимальной амплитудой пока еще является пик на частоте $f_{\text{ans}} \approx 5141$ Гц. При этом другие пики большой амплитуды, например на частоте $f_{\text{ans}} \approx 7400$ Гц, соответствуют асимметричным модам волны Лэмба и не могут определять резонанс толщины [14]. Модальное представление результа-

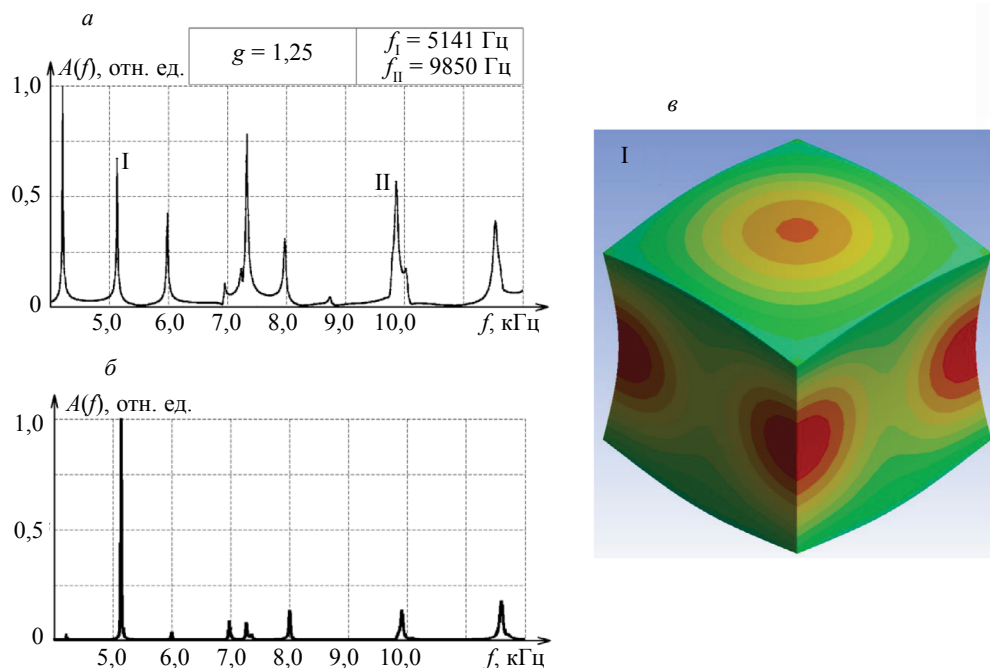


Рис. 3. Спектральное (слева) и модальное (справа) представления объекта контроля с квадратным сечением с габаритным коэффициентом $g = 1,25$:

a — АЧХ, снятая в одной точке; b — АЧХ, полученная с помощью мультипликативной обработки; v — модальное представление контролируемого объекта.

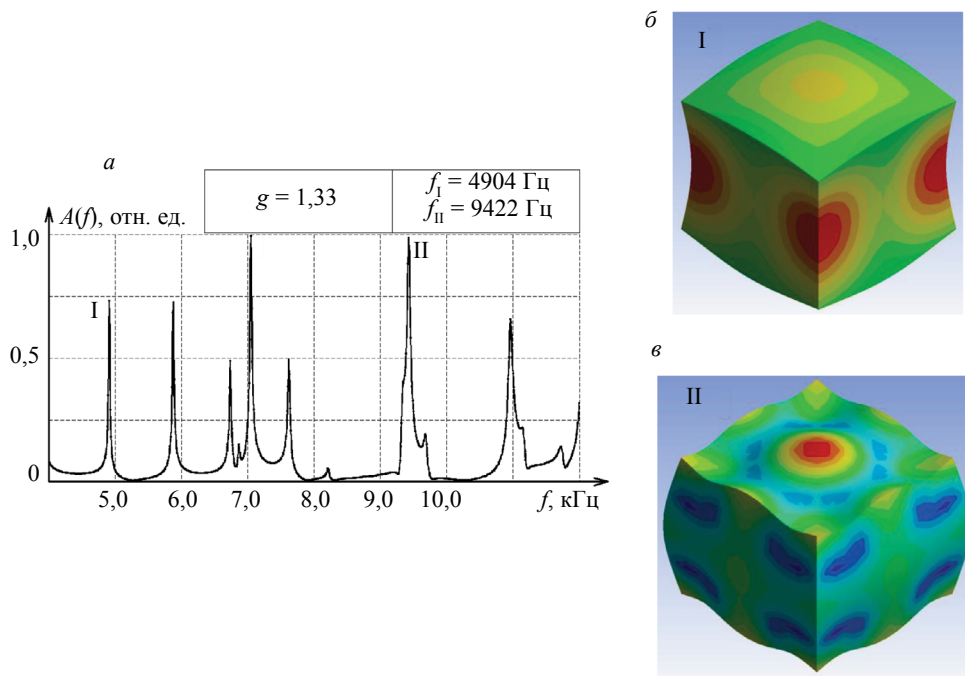


Рис. 4. Спектральное (слева) и модальное (справа) представления объекта контроля с квадратным сечением с габаритным коэффициентом $g = 1,33$:

a — АЧХ контролируемого объекта; b — модальное представление на частоте $f_{\text{ans}} \approx 4904$ Гц; $в$ — модальное представление на частоте $f_{\text{ans}} \approx 9422$ Гц.

тов моделирования для резонансной частоты $f_{\text{ans}} \approx 5141$ Гц показывает (рис. 3в), что в ОК с габаритным коэффициентом $g = 1,25$ еще преобладает продольная волна, хотя и очевидна предстоящая смена моды колебаний. Это подтверждает тот факт, что на АЧХ (см. рис. 3а) появляется сопоставимый по амплитуде пик на более высокой частоте ($f_{\text{ans}} \approx 9850$ Гц).

На рис. 4 показаны результаты моделирования волновых процессов в компактном ОК с габаритным коэффициентом $g = 1,33$. На спектре изделия (рис. 4а) видно, что появляется пик II с частотой $f_{\text{ans}} \approx 9422$ Гц, амплитуда которого превалирует над амплитудой пика I с частотой $f_{\text{ans}} \approx 4904$ Гц. Пики большой амплитуды на других частотах не определяют резонанс толщины, так как соответствуют асимметричным модам волны Лэмба [14].

Соотношение амплитуд для двух резонансных частот показывает, что с увеличением габаритного коэффициента происходит смена типа колебаний. Модальное представление колебаний на частоте $f_{\text{ans}} \approx 4904$ Гц (рис. 4б) показывает, что пик I соответствует продольной волне. Модальное представление колебательного процесса для пика II на частоте $f_{\text{ans}} \approx 9422$ Гц (рис. 4в) соответствует типу колебаний, представленному на рис. 1б, то есть волне Лэмба. Все это позволяет утверждать, что в данном изделии с $g = 1,33$ превалирующим резонансным колебанием становится волна Лэмба.

Физически процесс смены типа резонансного колебания толщины можно объяснить следующим образом. Видно, что с увеличением габаритного коэффициента колебания I становятся менее интенсивными по толщине: красная область в центре уменьшается. При этом возрастает их поперечная составляющая: красная область боковых граней увеличивается. Очевидно, что все это приводит к уменьшению амплитуды продольной волны I, так как ее энергия определяется именно интенсивностью колебаний по толщине. Одновременно с этим возрастает влияние поперечного эффекта, который увеличивает амплитуду колебания II. Колебание II по своей природе является комбинацией продольной и поперечной волн, где в данном случае преобладает поперечная составляющая.

Исходя из результатов моделирования, можно сделать вывод, что по мере возрастания габаритного коэффициента происходит трансформация типа изделия: протяженное изделие типа «свая» переходит в компактное изделие типа «свая», а затем — в компактное изделие типа «плита».

Полученные с помощью программы ANSYS результаты измерения основной частоты резонанса f_{ans} позволили рассчитать значения корректирующих коэффициентов β для рассмотренных компактных изделий типа «свая» при изменении габаритного коэффициента от $1/3$ до 1 и дали возмож-

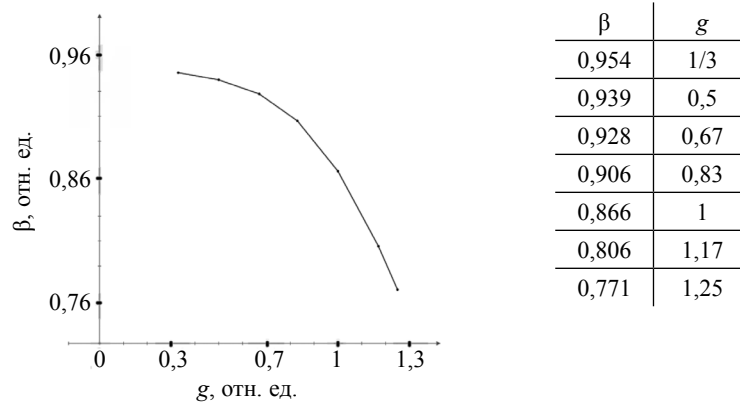


Рис. 5. Зависимость коэффициента коррекции β от габаритного коэффициента g для компактной области сваи.

ность построить зависимость $\beta(g)$ для компактной области сваи, в которой превалируют продольные колебания (рис. 5). Из графика видно, что увеличение габаритного коэффициента g приводит к уменьшению корректирующего коэффициента β . Момент перехода компактного изделия из компактной области сваи в компактную область плиты на зависимости $\beta(g)$ будет располагаться на интервале коэффициентов $g \approx 1,25—1,27$.

С учетом того, что коэффициент коррекции геометрической дисперсии скорости звука β определен как соотношение скорости звука в ограниченном изделии к скорости звука в ОК с неограниченными размерами ($\beta = C_{\text{огр}}/C_l$), можно сделать вывод, что при переходе от протяженного ОК типа «свая» к компактному ОК типа «плита» геометрическая дисперсия скорости звука снижает скорость продольной волны, которая приводит к уменьшению $\beta(g)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА β ОТ ГАБАРИТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА В КОМПАКТНОЙ ОБЛАСТИ ПЛИТЫ

Выше было показано, что однозначное определение превалирующего колебания определяется в компактных изделиях с квадратным сечением с габаритным коэффициентом $g \approx 1/3—1$. Далее, в изделиях с габаритным коэффициентом $g \approx 1,17—1,25$ наблюдается тенденция к смене превалирующего колебания. В ОК с габаритным коэффициентом $g = 1,33$ основной резонанс определяется волной Лэмба и составляет $f_{\text{анс}} \approx 9422$ Гц, что превышает теоретическое значение $f_p \approx 6667$ Гц. В этом случае коэффициент коррекции β становится больше 1, что позволяет утверждать о смене типа колебаний и переходе объекта из компактной области сваи в компактную область плиты.

На рис. 6 приведены результаты спектрального и модального представлений нескольких объектов моделирования из компактной области плиты, откуда видно, что с дальнейшим увеличением габаритного коэффициента g коэффициент β уменьшается: его значение стремится к 0,96. При этом частота искомого резонанса $f_{\text{анс}}$ смещается в низкочастотную область, а компактное изделие типа «плита» постепенно (начиная с $g \approx 5$) превращается в протяженную плиту. В конечном итоге у объекта $g = 6$ искомый резонанс составляет $f_{\text{анс}} \approx 6416$ Гц, что соответствует коэффициенту $\beta \approx 0,962$. Возникающие пики большой амплитуды на АЧХ объектов соответствуют асимметричным модам волны Лэмба, которые, как было отмечено в [14], не могут быть резонансными.

На рис. 7 приведена зависимость коэффициентов $\beta(g)$ в компактной области плиты. Вертикальная симптотическая линия, находящаяся вблизи габаритных коэффициентов $g \approx 1,25—1,27$, обозначает область перехода превалирующей продольной волны в компактном ОК квадратного сечения в волну Лэмба.

ДИСПЕРСИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА β ОТ ГАБАРИТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ДЛЯ КОМПАКТНЫХ ИЗДЕЛИЙ С КВАДРАТНЫМ СЕЧЕНИЕМ

Обобщенный график $\beta(g)$ для рассматриваемых ОК квадратного сечения представлен на рис. 8. На нем римскими цифрами обозначены участки I и IV, представляющие соответственно протяжен-

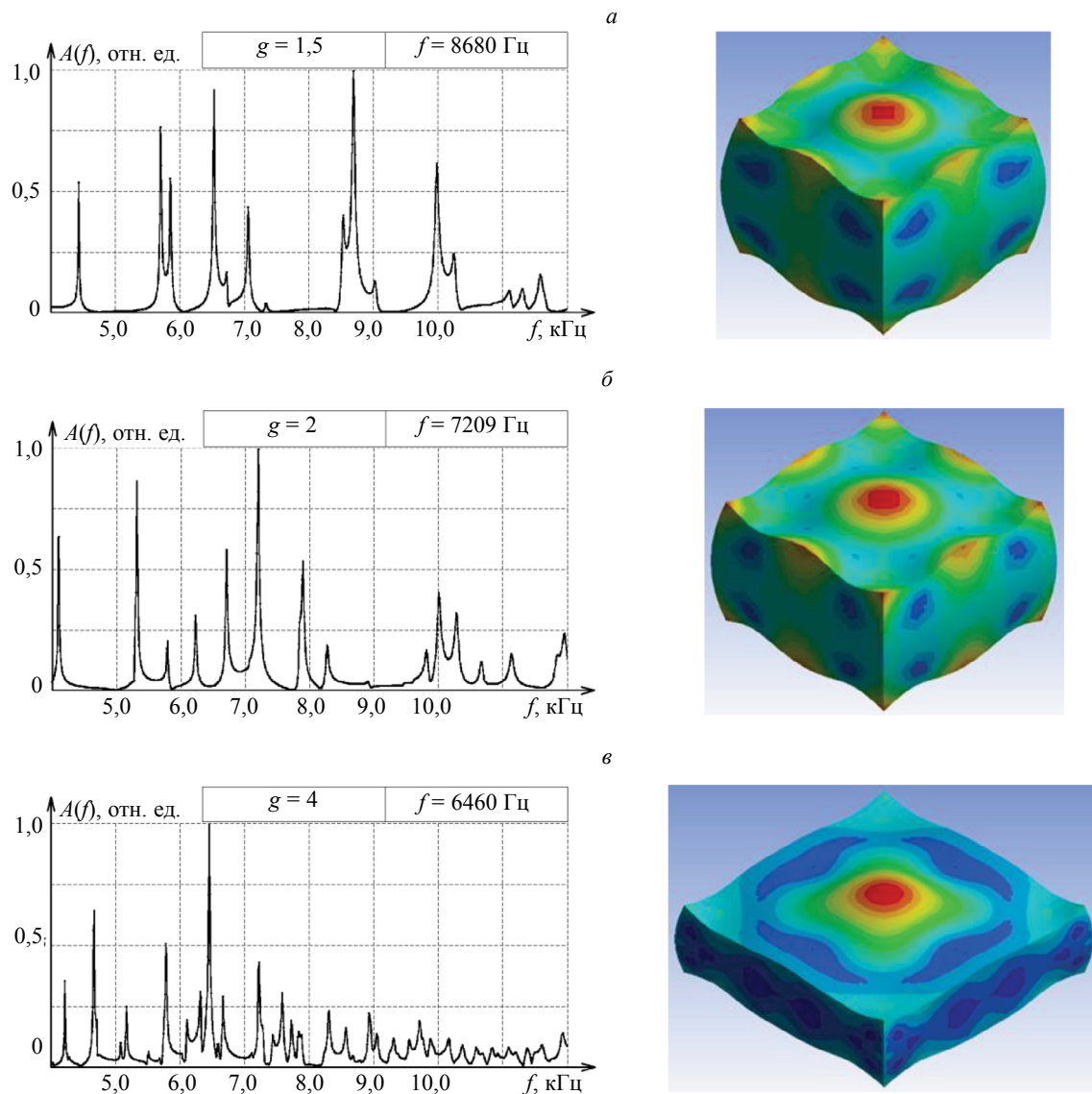
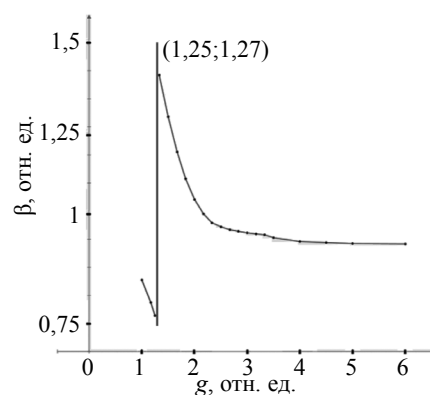


Рис. 6. Спектральное (слева) и модальное (справа) представления объектов контроля с квадратным сечением с габаритными коэффициентами g , равными: 1,5 (*a*); 2 (*б*); 4 (*в*).



β	g
1,413	1,33
1,302	1,5
1,081	2
1,008	2,5
0,992	3
0,969	4
0,962	6

Рис. 7. Зависимость коэффициента коррекции β от габаритного коэффициента g для компактной области плиты.

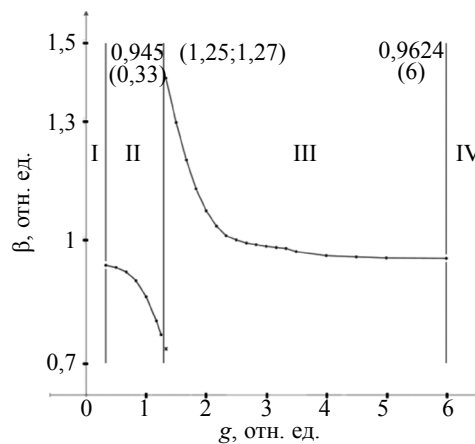


Рис. 8. Дисперсионная зависимость коэффициента коррекции β от габаритного коэффициента g .

ные области сваи и плиты, и участки II и III — компактные области сваи и плиты соответственно. Габаритный резонанс на участке II определяется продольной волной, а на участке III — симметричной модой волны Лэмба. Участки II и III разделены линией, обозначающей границу перехода мод.

Полученный в процессе моделирования график $\beta(g)$ хорошо согласуется с графиком геометрической дисперсии звука в стержне, построенным Рэлеем [15], с той лишь разницей, что результат моделирования для компактных ОК представлен в виде зависимости коэффициента коррекции β от габаритного коэффициента g . Выше было показано, что величина β представляет отношение скорости звука в компактном изделии к постоянному для данной марки бетона значению скорости в бесконечном полупространстве. Тем самым, изменение коэффициента коррекции β соответствует изменению скорости звука в компактном изделии. Увеличение параметра g можно трактовать как уменьшение измеряемой толщины H при постоянном значении размера D . Это, в свою очередь, соответствует уменьшению длины резонансной волны λ_p или увеличению собственной резонансной частоты f_p . Таким образом, можно утверждать, что зависимость $\beta(g)$ тождествена полученной Рэлеем дисперсионной зависимости $C(f)$. Данный факт позволяет говорить о дисперсионной зависимости коэффициента коррекции геометрической дисперсии скорости звука β от частоты собственных колебаний в компактных изделиях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Полученные аналитически значения коэффициента коррекции для различных компактных объектов контроля квадратного сечения позволяют достаточно просто осуществлять контроль таких изделий. Для проверки правильности данного расчета были проведены многочисленные эксперименты по определению скорости звука на реальных бетонных образцах с различными габаритными коэффициентами. Ниже приведены примеры контроля с помощью импакт-эхометода изделий толщиной $H = 300$ мм со следующими значениями габаритного коэффициента g : 0,5; 1; 1,5 и 2.

Скорость с помощью ультразвукового теневого метода измерялась на частоте 100 кГц в соответствии с ГОСТ 17624—2012. Измерение скорости звука импакт-эхометодом осуществлялось с помощью прибора Freedom Data PC производства фирмы «Olson Instruments» (URL: <https://olsoninstruments.com>). Данный прибор состоит из блока обработки информации и преобразователя (рис. 9а). Схема измерения для импакт-эхометода была выбрана в соответствии с ASTM C1383—15 с учетом того факта, что контролю подвергаются компактные изделия (рис. 9б). Согласно выбранной схеме, измерения проводились в центральной области образца, которая была ограничена по краям расстоянием $0,25H$. При этом расстояние между наносимым упругим ударом (импактом) и преобразователем не должно было превышать $0,4H$. В результате измерения значение скорости звука в каждом из исследуемых компактных изделий определялось с помощью полученного экспериментально значения резонансной частоты f_p и рассчитанного выше соответствующего коэффициента β .

На рис. 10 приведены АЧХ реальных экспериментальных образцов, полученные в ходе измерения импакт-эхометодом. По их результатам хорошо заметно смещение резонансной частоты, которое полностью повторяет тенденцию построенного по данным моделирования графика $\beta(g)$.

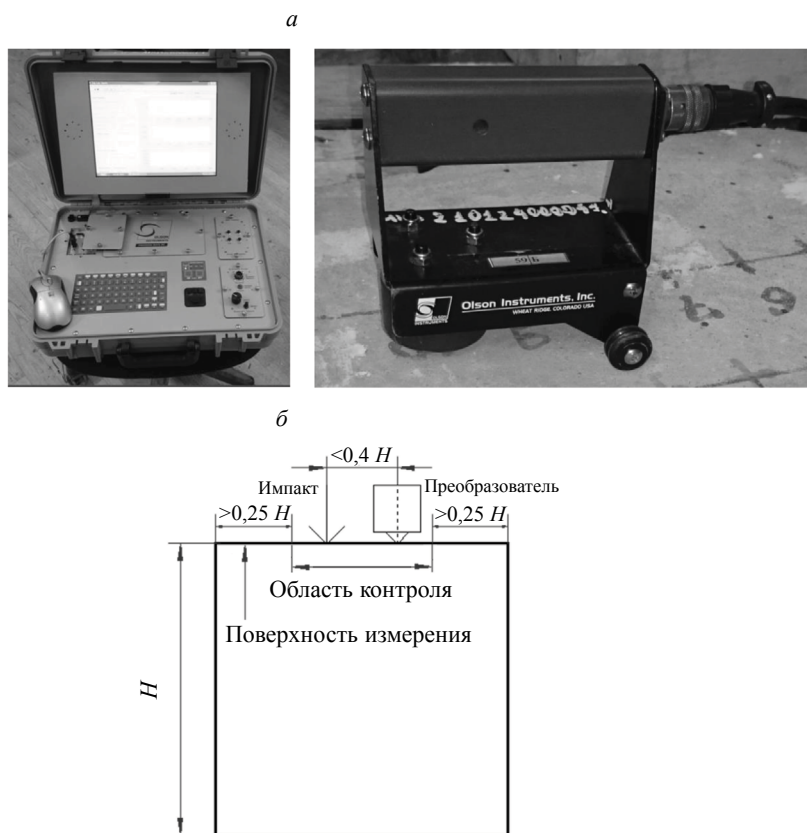
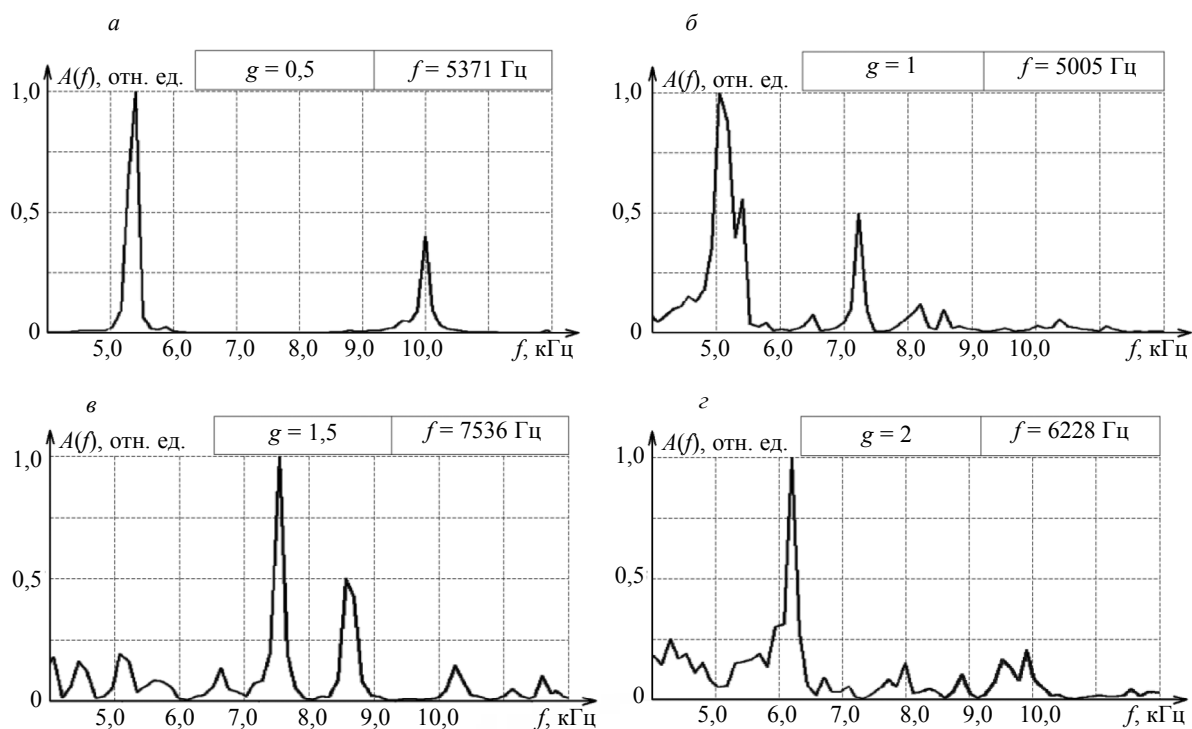


Рис. 9. Аппаратура (а) и схема измерения (б) импакт-эхометода.

Рис. 10. АЧХ реальных экспериментальных образцов:
а — $g = 0,5$; б — $g = 1$; в — $g = 1,5$; г — $g = 2$.

Так, у объекта $g = 1$ резонанс толщины немного ниже, чем у $g = 0,5$. При этом оба эти объекта входят в компактную область сваи. У объекта $g = 1,5$ резонанс резко увеличивается, что соответствует «замещению» типа резонансного колебания и переходу в компактную область плиты, а у $g = 2$ снова снижается, что также зафиксировано на построенном графике. Очевидно, что все это может свидетельствовать о правильности проведенного моделирования и верной тенденции построенной зависимости $\beta(g)$, изображенной на рис. 8. Здесь стоит отметить, что оборудование фирмы «Olson Instruments» (URL: <https://olsoninstruments.com>), с помощью которого и был реализован импакт-эхометод, включает в себя нелинейную обработку, что, безусловно, сказывается на форме получаемых спектров. Именно этим объясняется хорошее выделение резонансного пика в компактных объектах по сравнению с результатами моделирования. При этом о самой обработке никакой информации не дается.

Таблица 2

Результаты измерения скорости C_l теньвым и импакт-эхометодами

Габаритный коэффициент g	Скорость C_p , измеренная теньвым методом, м/с	Скорость C_p , измеренная импакт-эхометодом, м/с
0,5	3389	3432
1	3426	3468
1,5	3507	3473
2	3472	3457

Сравнение измерений скорости C_l в экспериментальных образцах теньвым и импакт-эхометодами приведено в табл. 2. Скорость в импакт-эхометодом рассчитывалась по формуле $C_l = \frac{2fH}{\beta}$.

Видно, что значения C_l различаются не более чем на 2 %. Данный факт также подтверждает правильность полученной в ходе моделирования зависимости $\beta(g)$. При этом без учета рассчитанного корректирующего коэффициента β погрешность измерения скорости резко возрастает. Так, для изделия с габаритным коэффициентом $g = 1,5$ она может превышать 20 %.

ВЫВОДЫ

Разработаны методы определения коэффициента коррекции геометрической дисперсии скорости звука β в компактных СК из бетона с квадратным сечением. Показано, что коэффициент коррекции β в компактных изделиях из бетона меняется при изменении габаритного коэффициента g . При этом график $\beta(g)$ имеет вид дисперсионной зависимости, подобной установленной Рэлеем зависимости $C(f)$ для стержня.

Рассчитанные с помощью моделирования значения коэффициента коррекции β позволили повысить точность измерения толщины компактных ОК, что подтверждают сравнительные эксперименты, проведенные с помощью импакт-эхометода и ультразвукового теневого метода. Тем самым, разработанные методики определения коэффициента β позволяют проводить высокоточный контроль компактных СК из бетона с квадратным сечением с помощью импакт-эхометода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sansalone M., Streett W.B. Impact-echo: nondestructive testing of concrete and masonry. Bullbrier Press, Jersey Shore, PA. 1997. 339 p.
2. Шутлов В.А. Основы физики ультразвука. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 280 с.
3. Hsieh C.T., Lin Y. Detecting debonding flaws at the epoxy-concrete interfaces in near-surface mounted CFRP strengthening beams using the impact-echo method // NDT & E International. 2016. V. 83. P. 1—13.
4. Juncal X., Xiong Y. Detection of concrete structural defects using impact echo based on deep networks // Journal of Testing and Evaluation. 2020. V. 49. P. 1—12.
5. Jacob L.L., Joseph McElderry, Jared S.B., Spencer W.G., Mazzeo B.A. Automated sounding for concrete bridge deck inspection through a multi-channel, continuously moving platform // NDT & E International. 2020. V. 109. P. 102—177.

6. *Al Imam Mohammad Ibn Saud*. Effectiveness of impact-echo testing in detecting flaws in prestressed concrete slabs // *Construction and Building Materials*. 2013. V. 47. P. 753—759.
 7. *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.
 8. *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.
 9. *Musab Alhawati, Amir Khan*. Evaluation of steel corrosion in concrete structures using impact-echo method // *Advanced Materials Research*. 2020. V. 1158. P. 147—164.
 10. *Качанов В.К., Соколов И.В., Авраменко С.Л.* Проблемы акустического контроля крупногабаритных строительных конструкций из бетона // *Дефектоскопия*. 2008. № 12. С. 12—22.
 11. *Качанов В.К., Соколов И.В., Авраменко С.Л., Тимофеев Д.В.* Многоканальный мультипликативный метод акустического контроля крупногабаритных компактных строительных конструкций из бетона // *Дефектоскопия*. 2008. № 12. С. 23—36.
 12. *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.
 13. *Ермолов И.Н., Алёшин Н.П., Потанов А.И.* Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн.2. Акустические методы контроля. Практик. пособие / Под ред. В.В. Сухорукова. М.: Высш. шк., 1991. 283 с.
 14. *Carino N.J.* Impact-echo: the fundamentals // *International Symposium on NDT in Civil Engineering*. 2015. P. 1—18.
 15. Рэлей. Теория звука. Т. 1. М.: ГИТТЛ, 1955. 503 с.
-