

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА КОРРЕКЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ДИСПЕРСИИ СКОРОСТИ ЗВУКА ДЛЯ КОМПАКТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ БЕТОНА

© 2020 г. В.К. Качанов^{1,*}, И.В. Соколов¹, С.А. Федоренко²

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 09.02.2020; после доработки 21.02.2020

Принята к публикации 21.02.2020

Приведены результаты исследований по использованию импакт-эхометода для измерения толщины компактных строительных конструкций из бетона. Показано, что в компактных строительных конструкциях, у которых измеряемая толщина сопоставима с иными размерами объекта контроля, не удается определять искомую толщину изделия по собственной резонансной частоте из-за геометрической дисперсии скорости звука. Влияние геометрической дисперсии для каждого компактного изделия различно, вследствие чего следует измерять коэффициент коррекции геометрической дисперсии скорости звука β индивидуально для каждого компактного изделия. Предложена методика определения коэффициента β в компактных изделиях, обеспечивающая как определение основной частоты резонанса, так и устранение влияния геометрической дисперсии скорости звука на точность измерения толщины компактного объекта.

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

DOI: 10.31857/S0130308220040016

ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1], с помощью ультразвукового (УЗ) эхо-импульсного метода неразрушающего контроля удается контролировать строительные конструкции (СК) из бетона (железобетона) толщиной не более одного метра. В том случае, когда толщины стен, перекрытий, фундаментов зданий превышают эту величину, то для их измерения используют акустический импакт-эхометод, основанный (как и резонансный метод) на анализе собственных частот контролируемого изделия [2—5].

Импакт-эхометод достаточно прост в своей реализации: при помощи специального устройства (импактора) совершают короткий, но сильный механический удар (англ. — *іmpact*) по поверхности контролируемого изделия (рис. 1). Этот удар инициирует в объекте контроля (ОК) акустические затухающие колебания, резонансная частота которых f_p определяется измеряемой толщиной изделия H и которые регистрируются широкополосным приемным преобразователем (ПП), установленным на небольшом удалении от импактора.

Так как по временному представлению сигнала достаточно сложно определить толщину СК из бетона, то анализ результата измерений проводят по спектру сигнала [6], с помощью которого определяют частоту f_p , на которой возникает резонанс толщины бетонного изделия. По значению резонансной частоты f_p определяют толщину изделия H по формуле [6]:

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

где C_l — скорость распространения продольных акустических колебаний в бетоне, рассчитанная для бесконечного полупространства; β — эмпирически найденный коэффициент, корректирующий влияние геометрической дисперсии скорости звука в реальных СК с ограниченными размерами.

Как известно, геометрическая дисперсия скорости звука возникает в изделиях, у которых длина волны сопоставима с габаритами ОК, а при использовании импакт-эхометода длина волны λ_p на частоте резонанса соответствует удвоенной толщине изделия ($\lambda_p \sim 2H$). Тем самым, при использовании импакт-эхометода для измерения толщины H реальных изделий с габаритами a и b всегда приходится иметь дело с геометрической дисперсией скорости звука.

За рубежом импакт-эхометод стал широко применяться в строительной практике (начиная с 1990-х годов) благодаря его преимуществам: он прост в использовании, не требует дорогого обо-

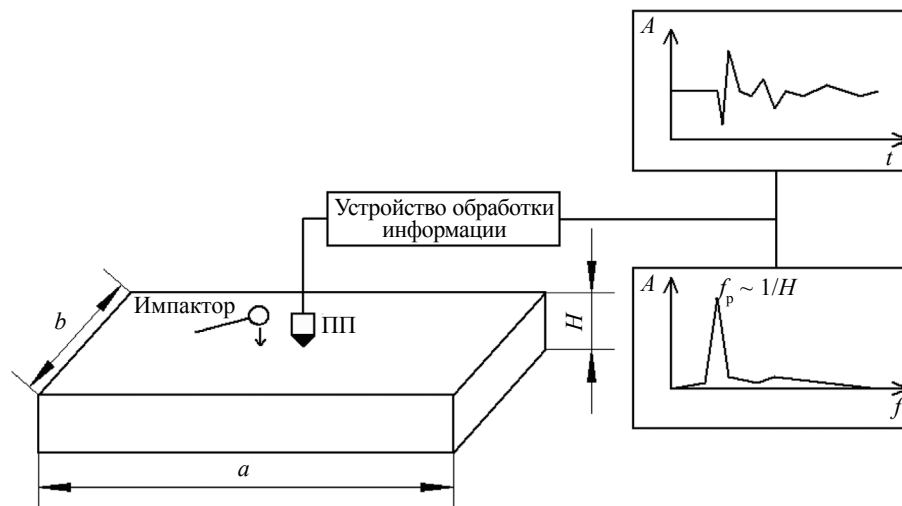


Рис. 1. Схема импакт-эхометода измерения толщины бетонной плиты с временным и спектральным представлениями сигнала.

рудования, но при этом позволяет контролировать СК с толщиной до 10 м и более. Такая особенность импакт-эхометода объясняется тем, что при достаточно большой толщине изделий H резонансная частота мала, поэтому мало и затухание акустических колебаний в бетоне. Эти преимущества позволили использовать импакт-эхометод для измерения толщины изделий типа «плита» (стен, фундаментов, перекрытий и др.), а также для контроля СК типа «свая» (собственно забитых свай, колонн, мостовых опор и др.). В большинстве развитых стран импакт-эхометод является обязательным методом контроля строительных объектов как на стадии сооружения, так и в процессе их эксплуатации [7, 8]. Однако в России применение этого метода соответствующими документами не регламентировано, поэтому он активно не используется и, за редким исключением [9—11], не исследуется.

ОСОБЕННОСТИ ИМПАКТ-ЭХОМЕТОДА КОНТРОЛЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО КОЭФФИЦИЕНТА β В ПРОТЯЖЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Особенностью применения импакт-эхометода на практике является тот факт, что с его помощью контролируют только «протяженные» СК и не контролируют «компактные» изделия. В компактных ОК все габариты (H , a , b) сопоставимы, из-за чего на спектре компактного изделия достаточно сложно определить искомый резонанс $f_p \sim 1/H$ на фоне многочисленных резонансов, обусловленных сопоставимыми габаритами a и b .

Под понятие «протяженное» изделие типа «плита» подпадают плоскопараллельные СК (стены, фундаменты, перекрытия), толщина которых H не менее чем в шесть раз меньше иных габаритов a и b [7]. У протяженных изделий типа «свая» длина H должна быть не менее чем в три-пять раз больше размеров поперечного сечения сваи [6]. Только при таких условиях искомая частота f_p однозначно определяется на спектре ОК на фоне резонансных пиков, соответствующих иным габаритам ОК.

Так как большинство реальных СК имеют конечные значения габаритов a и b , то при их контроле импакт-эхометодом необходимо учитывать коэффициент коррекции геометрической дисперсии звука β , компенсирующий погрешность, возникающую из-за дисперсии скорости звука (1). Для протяженных СК типа «плита» $\beta \approx 0,96$ [7]; для протяженных изделий типа «свая» $\beta \approx 0,95$ [6]. Несмотря на столь незначительную разницу в значениях коэффициента β для свай и для плит, их различие принципиально, так как оно подчеркивает разные волновые процессы, определяющие резонанс в этих ОК.

В плите под действием удара возникают продольные (P), поперечные (S) и поверхностные (R) волны (рис. 2а). Значения скоростей волн P , S и R в бетоне при коэффициенте Пуассона $\nu = 0,2$ соотносятся как 1 : 0,62 : 0,56 [12]. Множественные переотражения продольной волны (рис. 2б) приводят к возникновению в плите симметричных (а) и несимметричных (б) волн

Рис. 2. Распространение упругих механических колебаний в ОК:
 а — продольные (P), поперечные (S) и поверхностные (R) волны; б — продольная волна в пластине (сплошная линия — волна сжатия; штриховая линия — волна растяжения).

Лэмба (рис. 3), при этом скорость симметричной волны Лэмба меньше скорости продольной волны. Эти две волны определяют характер геометрической дисперсии звука в различных изделиях [13]: в СК типа «плита» резонанс толщины определяется волнами Лэмба, а в изделиях же типа «свая» резонанс длины ОК обусловлен волной растяжения-сжатия, то есть продольной волной [6].

Для расчета коэффициента коррекции геометрической дисперсии звука β в компактных СК из бетона необходимо сопоставить значение скорости звука в реальных изделиях с ограниченными габаритами a и b и значение скорости звука в идеализированном ОК с неограниченными размерами (бесконечном полупространстве), в котором скорость продольных акустических колебаний C_p определяется исключительно физико-механическими характеристиками бетона [1]:

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

где E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; ρ — плотность.

Тем самым, в ОК с неограниченными размерами геометрическая дисперсия скорости звука отсутствует ($\beta = 1$). Формулу (1) для толщины H в реальных изделиях с ограниченными размерами можно записать в следующем виде:

$$H = \frac{C_{\text{орп}}}{2f_p}. \quad (3)$$

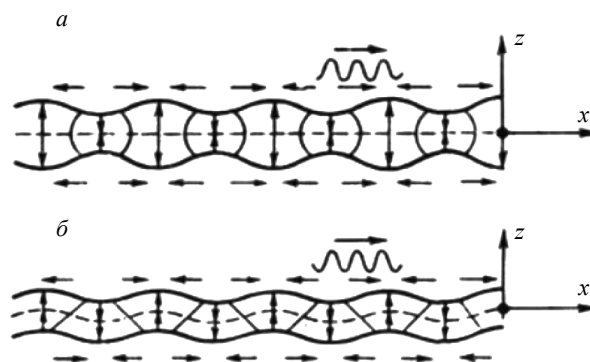
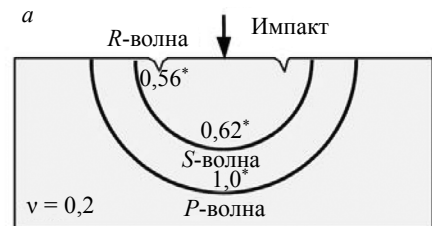
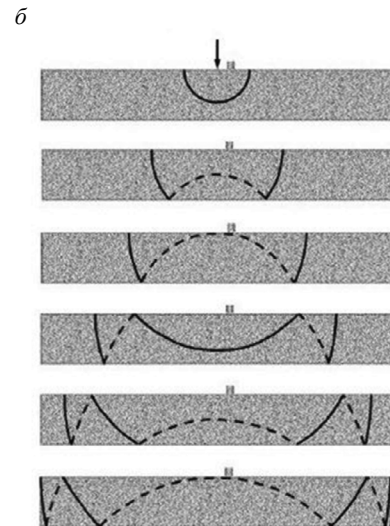


Рис. 3. Изображение движения частиц среды в пластинах при распространении в них симметричной (а) и асимметричной (б) волн Лэмба.

Сравнение формул (1) и (3) позволяет определить коэффициент коррекции β как показатель различия скоростей в реальных ОК с ограниченными размерами и в ОК с неограниченными размерами, возникающего из-за эффекта геометрической дисперсии скорости звука в изделии с ограниченными размерами [14]:



*Относительное значение скорости



$$\beta = \frac{C_{\text{огр}}}{C_l}. \quad (4)$$

Особенностью протяженных реальных изделий типа «плита» является тот факт, что коэффициент коррекции геометрической дисперсии скорости звука $\beta \approx 0,96$ для протяженных СК постоянен для изделий с любыми значениями a и b (но при условии $H \ll a, b$). Вместе с тем в последние годы появилось много работ, в которых значение коэффициента коррекции для протяженных изделий уточняется [15]. Так, Гибсон и Попович в [16] используют следующую формулу для определения скорости симметричной волны Лэмба в ограниченных изделиях типа «плита»:

$$C_{\text{огр}} \approx \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}. \quad (5)$$

Поэтому коэффициент коррекции геометрической дисперсии $\beta = \frac{C_{\text{огр}}}{C_l}$ для протяженных изделий, вычисленный по формуле (6) для различных значений коэффициента Пуассона [16]:

$$\beta = \frac{C_{\text{огр}}}{C_l} = \sqrt{\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)(1-\nu^2)}}, \quad (6)$$

незначительно отличается от значений коэффициента коррекции β , полученных в [16] (табл. 1).

Таблица 1

Значения коэффициента коррекции геометрической дисперсии скорости звука для бетонных плит с различным коэффициентом Пуассона [15]

Коэффициент Пуассона ν	Формула (6)	Источник [16]
0,18	0,976	0,955
0,2	0,968	0,953
0,22	0,959	0,950

ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМПАКТ-ЭХОМЕТОДА ПРИ КОНТРОЛЕ КОМПАКТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Как было сказано выше, контроль компактных СК в производственных условиях практически не используется из-за двух проблем. Во-первых, из-за того, что на спектре компактного ОК сложно однозначно определить основную резонансную частоту $f_p \sim 1/H$, и, во-вторых, из-за того, что для каждого нового компактного ОК необходимо рассчитывать свой коэффициент коррекции β .

Вместе с тем существует определенное число компактных бетонных изделий больших размеров (фундаментные блоки, мостовые опоры и др.), контроль которых возможно производить только с помощью импакт-эхометода, что определяет необходимость разработки соответствующей методики контроля. Кроме того, существуют компактные бетонные изделия небольшого размера (строительные блоки, бордюрные камни, тестовые изделия кубической формы и др.), которые, как это будет показано ниже, также целесообразно контролировать с помощью импакт-эхометода.

Как это было отмечено выше, в основе обеих проблем лежит ярко выраженная геометрическая дисперсия скорости звука в компактных изделиях, которая существенно превышает дисперсию звука в протяженных ОК. Этот эффект впервые объяснил Рэлей [17] на примере стального стержня круглого сечения, длина которого значительно больше радиуса поперечного сечения R (рис. 4).

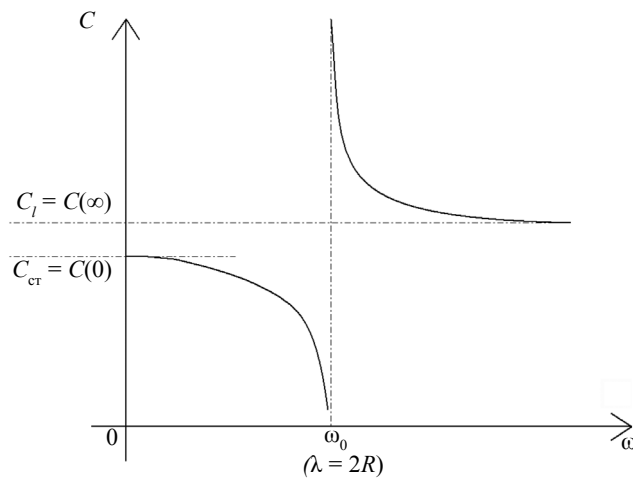


Рис. 4. Зависимость скорости звука C от частоты $\omega = 2\pi f$ в стержне радиусом R .

Также в [17] показано, что подобная дисперсионная зависимость скорости звука характерна и для длинного стержня с квадратным сечением $D = a = b$. Зависимость скорости звука в СК от габаритного коэффициента D/H также имеет область выраженной геометрической дисперсии, размеры которой определяются габаритами компактного изделия. Область выраженной геометрической дисперсии для компактного ОК разделяется на две части: низкочастотную (что характерно для изделий типа «свая») и высокочастотную (что характерно для изделий типа «плита»).

Вне области выраженной геометрической дисперсии для свай (в которой $\lambda \gg D$) резонанс длины определяет продольная волна, дисперсия в длинной свае постоянна, коэффициент коррекции $\beta_{\text{св}} \approx 0,95$. Вне области выраженной геометрической дисперсии для плиты (в которой $\lambda \ll D$) резонанс толщины определяют волны Лэмба, коэффициент коррекции постоянен $\beta_{\text{пл}} \approx 0,96$. Тем самым, с помощью дисперсионной характеристики можно обозначить как области с постоянной геометрической дисперсией, доступные для контроля импакт-эхометодом, так и компактную область с ярко выраженной геометрической дисперсией, которая не контролируется традиционным импакт-эхометодом.

Анализ дисперсионной характеристики для СК квадратного сечения позволил сформулировать последовательность действий, с помощью которых следует осуществлять контроль компактных изделий импакт-эхометодом. Вначале с помощью традиционного импакт-эхометода следует определить искомую резонансную частоту f_p . Затем для изделия с известной толщиной H необходимо определить скорость звука $C_{\text{огр}}$ в компактном изделии по формуле $C_{\text{огр}} = 2f_p H$. После этого следует измерить скорость продольной волны в бетоне для бесконечного полупространства C_p , что возможно сделать с помощью УЗ эхо-импульсного метода на частоте $f_{\text{уз}} \gg f_p$. И в заключении следует определить коэффициент коррекции геометрической дисперсии скорости звука $\beta = C_{\text{огр}}/C_p$, позволяющий скомпенсировать разницу между значением скорости звука в измеряемом компактном ОК и значением скорости продольной волны в бетоне для бесконечного полупространства.

Кроме того, из анализа дисперсионной характеристики стало ясно, что для вычисления коэффициента β необходимо разработать методику определения типа колебания, определяющего габаритный резонанс компактного изделия. С этой целью нами были разработаны и использовались две методики определения корректирующего коэффициента β для компактных СК: теоретическая и экспериментальная. С помощью теоретической методики исследовали дисперсионные зависимости коэффициента коррекции β для разных по форме ОК, выясняли тип колебания в компактном изделии, соответствующий его габаритному резонансу, а также осуществляли выбор оптимальных точек расположения приемного преобразователя на поверхности компактного ОК. Практическую модель применяли как для подтверждения теоретических результатов, так и для практического использования при контроле компактных изделий. В обеих методиках использовали моделирование в программной среде ANSYS [18], с помощью которого определялся преобладающий тип колебаний в компактном изделии при помощи спектрального и модального методов представления результатов расчета.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА КОРРЕКЦИИ β ДЛЯ ПРОТЯЖЕННОЙ БЕТОННОЙ ПЛИТЫ

Прежде чем использовать разработанные нами экспериментальную и теоретическую методики определения корректирующего коэффициента β для компактных изделий, покажем их применимость для вычисления коэффициента β для протяженной ОК типа «плита», у которого толщина $H = 0,3$ м, $a = 1,9$ м, $b = 1,8$ м. Для экспериментального определения коэффициента β по формуле (4) необходимо измерить скорость C_l и скорость $C_{огр}$. Скорость C_l определяется УЗ методом на относительно высокой частоте, при которой влияние геометрической дисперсии, как это было сказано выше, практически отсутствует. Так как на частоте 100 кГц протяженность УЗ волны в бетоне $\lambda \ll H, a, b$, то измеренное на этой частоте УЗ теневым методом значение скорости ультразвука $C_l \approx 4000$ м/с соответствует скорости звука в ОК с неограниченными размерами. Измерение скорости $C_{огр}$ проводили импакт-эхометодом с помощью прибора Freedom Data PC Platform фирмы Olson Instruments, Inc. (рис. 5а).

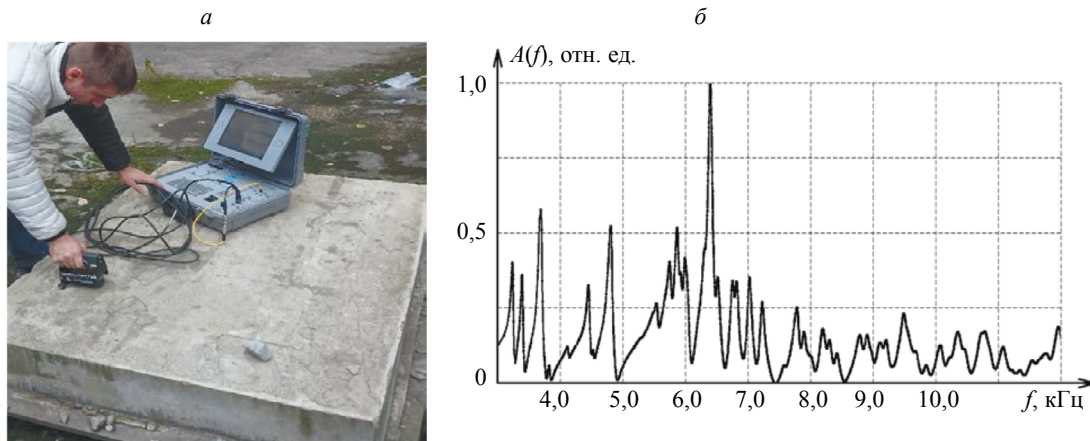


Рис. 5. Протяженное изделие типа «плита» (а) и его АЧХ (б).

На нормированной АЧХ плите (рис. 5б) четко виден только один резонансный пик, соответствующий измеряемой толщине H ($f_p \approx 6380$ Гц). Резонансные частоты, соответствующие иным габаритам, находятся «далеко» от резонансной частоты $f_p \sim 1/H$, так как размеры габаритов a и b сильно отличаются от искомой толщины H . Скорость звука в данной бетонной плите с ограниченными размерами выражаем из формулы (3): $C_{огр} = 2f_p H \approx 3830$ м/с.

Теперь, зная значения скорости C_l (полученной с помощью УЗ теневого метода) и скорости $C_{огр}$ (полученной с помощью импакт-эхометода), вычисляем коэффициент коррекции геометрической дисперсии скорости в протяженной плите по формуле (4): $\beta \approx 0,96$. Тем самым, экспериментально полученное значение коэффициента β для протяженной плиты из бетона соответствует общепринятому значению β для плит [7].

На следующем этапе проводится теоретическое вычисление коэффициента β для той же протяженной плиты из бетона с помощью метода конечных элементов в программной среде ANSYS [18]. Для этого задаются характеристики моделируемого изделия: для плиты, у которой предварительно измеренная скорость теневым методом составила $C_l \approx 4000$ м/с (что соответствует марке бетона М-300), упругие константы бетона выбираются исходя из этого значения скорости: плотность $\rho = 2400$ кг/м³, модуль Юнга $E = 34,56$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$. Затем в программе ANSYS с помощью гармонического анализа строится АЧХ для плиты и по ней определяется положение максимального пика: $f_{ans} = 6390$ Гц (что близко к частоте $f_p \approx 6380$ Гц, полученной импакт-эхометодом).

Далее рассчитывается теоретическое значение резонансной частоты по формуле $f_p = \beta C_l / 2H$ без учета геометрической дисперсии ($\beta = 1$). Учитывая, что $H = 0,3$ м, а $C_l = 4000$ м/с, получим $f_p \approx 6667$ Гц. Взяв отношение резонансных частот, полученных при использовании гармонического анализа и при теоретическом расчете, находим коэффициент $\beta = f_{ans} / f_p \approx 0,96$, значение которого соответствует экспериментально полученному.

Таким образом, расчет коэффициента β теоретическим и экспериментальным методами дал одинаковые результаты, что позволяет сделать вывод о достоверности предложенных методик и о возможности (и целесообразности) использования метода конечных элементов в программной среде ANSYS при определении корректирующих коэффициентов β в компактных объектах контроля.

Выше было показано (4), что коэффициент коррекции β характеризует различия скоростей в ОК с ограниченными размерами и в идеализированном бесконечном полупространстве. Теперь можно дополнить определение коэффициента коррекции β как показатель различия резонансной частоты f_{ans} , полученной с помощью моделирования в среде ANSYS, и частоты f_p , полученной при $\beta = 1$:

$$\beta = \frac{f_{\text{ans}}}{f_p}. \quad (7)$$

МОДАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Здесь следует отметить, что моделирование в среде ANSYS позволяет получить не только АЧХ объекта с помощью гармонического анализа, но и дает возможность определить тип колебаний для каждой частоты спектра в компактном изделии с помощью инструментов визуализации, что будет использовано при определении дисперсионной зависимости коэффициента коррекции β . На рис. 6 для рассматриваемой плиты квадратного сечения показана визуализация колебаний плиты на резонансной частоте 6390 Гц в виде интенсивности колебания участков поверхности ОК.

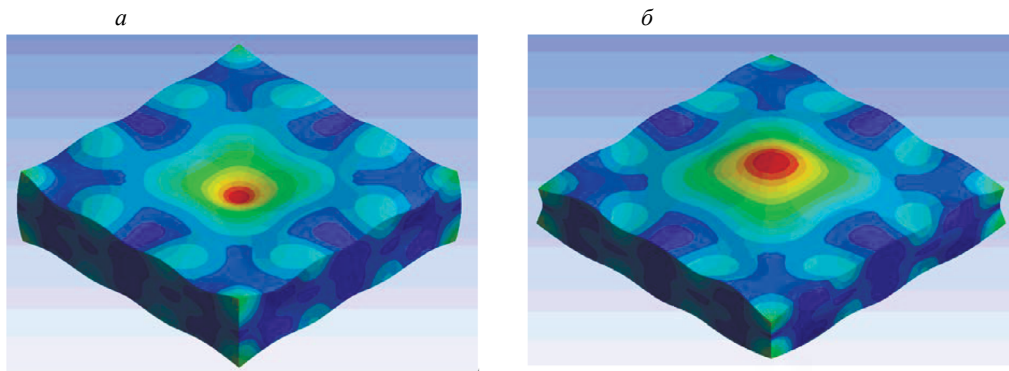


Рис. 6. Модальное представление резонанса толщины плиты в ANSYS:
а — фаза максимального сжатия; б — фаза максимального растяжения.

Видно, что у плиты максимум интенсивности приходится на центральную область, а именно — на место возбуждения колебаний. При этом колебания плиты на данной частоте проходят симметрично, варьируясь между фазами максимального сжатия (а) и максимального растяжения (б), что соответствует симметричной моде волны Лэмба.

Визуализация колебаний для каждой конкретной резонансной частоты позволяет определять тот или иной вид колебания в области компактности не только для объектов типа «плита», но и для изделий типа «свая». С помощью модального представления резонанса толщины сваи (рис. 7) видно, что максимум интенсивности колебаний приходится на всю поверхность сваи. При этом свая равномерно сжимается и растягивается. Такой тип колебаний в свае соответствует продольной волне [15].

Как это будет показано дальше, в одном и том же компактном ОК возможно одновременное присутствие как продольных колебаний, характерных для

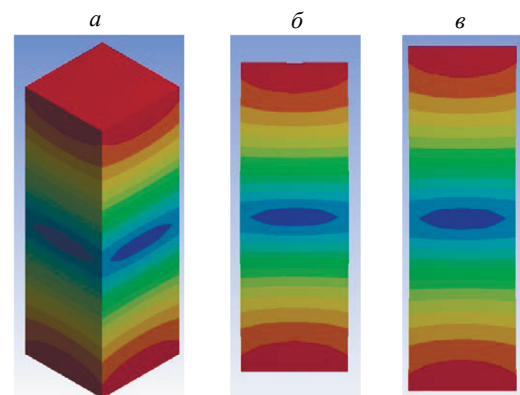


Рис. 7. Модальное представление резонанса толщины сваи:
а — общий трехмерный вид сваи; б — фаза максимального сжатия сваи;
в — фаза максимального растяжения сваи.

изделия типа «свая», так и волн Лэмба, типичных для изделий типа «плита». Модальное представление колебаний позволяет определить тип резонанса на той или иной частоте спектра и, тем самым, играет ключевую роль в определении коэффициента β для конкретного компактного ОК.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА КОРРЕКЦИИ β ДЛЯ КОМПАКТНОГО БЕТОННОГО ИЗДЕЛИЯ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

С помощью изложенных выше методик определим коэффициент β для компактного ОК с квадратным сечением с габаритным коэффициентом $g = D/H = 1,25$ (с толщиной $H = 0,3$ м и с размером граней $a = b = D = 0,375$ м).

АЧХ этого изделия (рис. 8а) получена в результате моделирования в программной среде ANSYS для случая, когда виртуальный импактор расположен в центре плиты, а ПП совмещен с импактором. Из АЧХ видно, что пик с максимальной амплитудой располагается на частоте $f_{\text{ans}} \approx 5140$ Гц. Однако однозначно определить, что это резонансный пик, частота которого определяется искомой толщиной ($f_p \sim 1/H$), сложно.

Для точного определения частоты f_p использовался предложенный нами мультипликативный метод моделирования, подобный предложенному ранее в МЭИ мультипликативному импакт-эхо-методу [10], при котором измерения компактного изделия производились в нескольких положениях ПП на поверхности ОК, а затем результаты парциальных измерений перемножались.

При мультипликативном методе моделирования в программной среде ANSYS также рассчитывались дополнительные спектры, получаемые при различных положениях виртуального приемного преобразователя на поверхности ОК (рис. 8б, в). После перемножения парциальных спектров на итоговой АЧХ компактного изделия (рис. 8г) однозначно вычисляли искомую резонансную частоту: $f_{\text{ans}} \approx 5140$ Гц. Далее, с учетом того, что $H = 0,3$ м и $C_l = 4000$ м/с, определяли частоту $f_p = C_l/2H \approx 6667$ Гц. Затем по формуле (7) рассчитывали коэффициент коррекции $\beta \approx 0,77$.

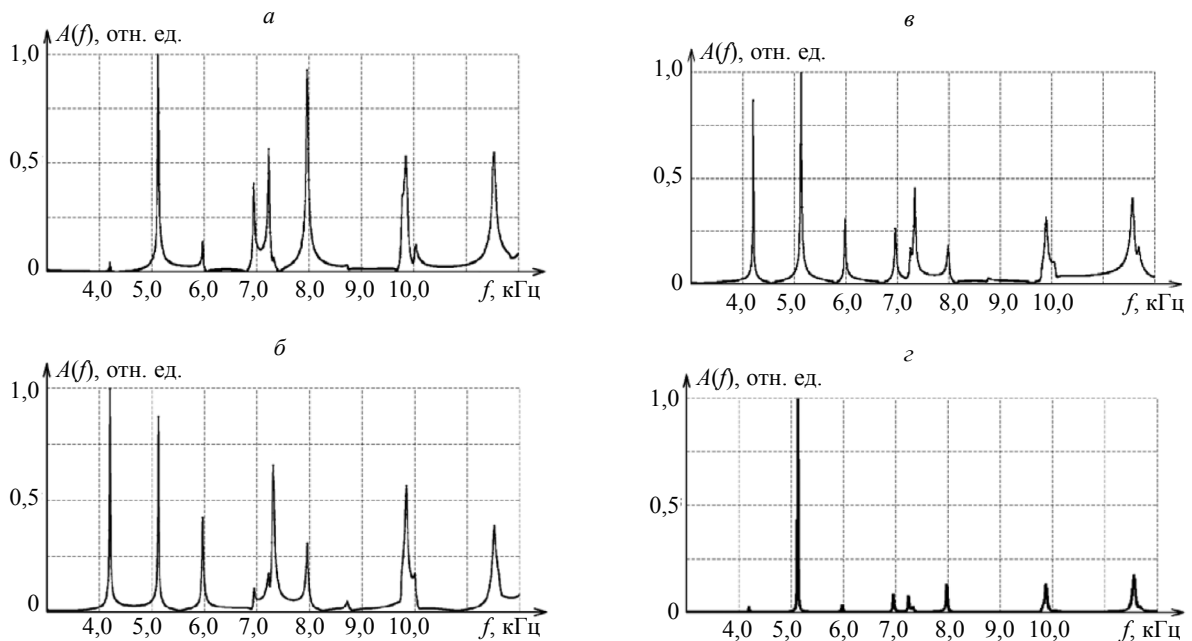


Рис. 8. Результаты моделирования парциальных АЧХ компактного изделия из бетона с квадратным сечением $D = 0,375$ м и толщиной $H = 0,3$ м при различных положениях ПП (а—в), а также результат их перемножения (г).

Отдельно необходимо пояснить выбор оптимального положения виртуального импактора и виртуального приемника. Так как в изделиях типа «плита» резонанс определяется симметричной модой волн Лэмба, то наилучшим местом для положения импактора является центр плиты, что позволяет избежать влияния границ ОК на результат измерения. Положение виртуального ПП необходимо выбирать на оси симметрии блока (для определенности в данном примере все измере-

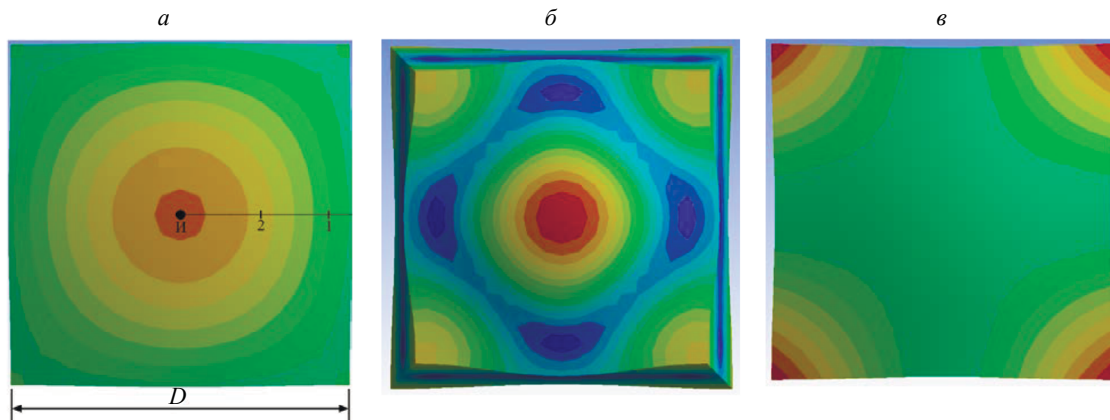


Рис. 9. Модальные представления колебаний бетонного изделия ($D = 0,375$ м, $H = 0,3$ м) на частотах: a — $f \approx 5140$ Гц (искомый резонанс толщины); b — $f \approx 8000$ Гц; c — $f \approx 4100$ Гц. И — местоположение виртуального импактора и виртуального ПП в центре изделия; 1 и 2 — расположение точек виртуального ПП для минимизации спектральных линий на частоте $f \approx 8000$ Гц (b) и на частоте $f \approx 4100$ Гц (c).

ния проводили на горизонтальной оси). С помощью моделирования было установлено, что для однозначного определения искомой резонансной частоты с помощью мультипликативной обработки сигналов в данном изделии достаточно двух положений виртуального ПП (точки 1 и 2 на рис. 9а). Первая точка должна располагаться на расстоянии $\approx D/16$ относительно конца горизонтальной оси, а вторая — на расстоянии $\approx D/4$. Выбор указанных точек проводился с помощью модального представления колебаний в изделии на наиболее значимых частотах. Так, АЧХ, полученная при расположении виртуального импактора и виртуального ПП в центре ОК (рис. 8а), содержит несколько пиков, амплитуда которых сопоставима с резонансом толщины $f_{\text{анс}} \approx 5140$ Гц. Эти пики не позволяют однозначно определить искомый резонанс и поэтому их следует минимизировать.

Вначале был минимизирован самый большой пик на частоте $f \approx 8000$ Гц. Для этого с помощью моделирования в среде ANSYS было рассчитано модальное представление колебаний ОК на частоте $f \approx 8000$ Гц (рис. 9б), которое показало, что минимальная амплитуда спектральной составляющей для данной частоты будет находиться при расположении виртуального приемника в точке 1. Действительно, на АЧХ, построенной с помощью моделирования для положения виртуального ПП в этой точке, пик с частотой 8000 Гц практически отсутствует (рис. 8б). Однако на этой же АЧХ присутствует пик с большой амплитудой на частоте $f \approx 4100$ Гц, который нужно минимизировать. Помимо этого, на обеих АЧХ (рис. 8а, б) присутствует пик на частоте $f \approx 7400$ Гц, который также желательно уменьшить. Таким образом, для выбора второй точки нужно соблюсти два условия: уменьшить амплитуды пиков на частоте 4100 Гц и на частоте 7400 Гц.

Из модального представления колебаний ОК на частоте $f \approx 4100$ Гц (рис. 9в) было установлено, что минимальная амплитуда спектральной составляющей для этой частоты может быть получена при расположении виртуального ПП практически в любой точке на горизонтальной оси. Так, при расположении виртуального ПП в точке 2 уменьшается как амплитуда пика на частоте $f \approx 4100$ Гц, так и амплитуда пика на частоте $f \approx 7400$ Гц. При этом амплитуда пика искомого резонанса $f \approx 5140$ Гц становится максимальной (рис. 8в). После перемножения парциальных спектров (рис. 8а—в) искомый пик на частоте $f \approx 5140$ Гц определяется однозначно (рис. 8г).

Таким образом, с помощью модального представления колебаний удастся выбрать оптимальные положения ПП на поверхности компактного ОК для однозначного определения искомой резонансной частоты с помощью последующей мультипликативной обработки.

Экспериментальное определение коэффициента β было проведено на реальном бетонном изделии с такими же габаритными размерами ($H = 300$ мм, $a = b = D = 375$ мм, $g = D/H = 1,25$). Значение продольной скорости УЗ колебаний было измерено теневым методом на частоте 100 кГц с помощью УЗ дефектоскопа «МОНОЛИТ» и составило $C_l \approx 3930$ м/с. Значение $f_p = C_l/2H \approx 6550$ Гц.

Измерение значения резонансной частоты $f_{\text{изм}}$ проводили с помощью оборудования фирмы «Olson Instruments». При этом также использовалась мультипликативная обработка сигналов двух дополнительных измерений. Итоговый результат мультипликативной обработки показан на рис. 10: на АЧХ компактного изделия отчетливо определяется резонанс на частоте $f_{\text{изм}} \approx 5100$ Гц.

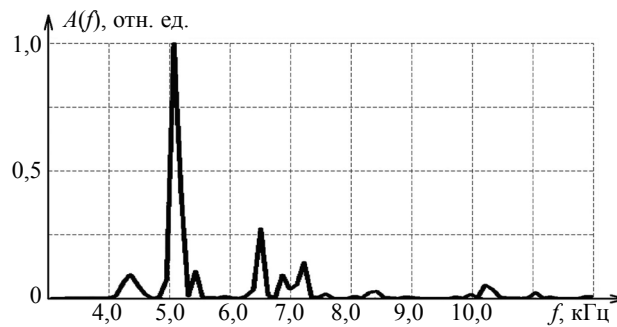


Рис. 10. Результат мультипликативной обработки при экспериментальном определении резонансной частоты f_p в компактном изделии ($H = 300$ мм, $a = b = D = 375$ мм, $g = D/H = 1,25$).

Далее определялся коэффициент коррекции β для исследуемого компактного ОК с габаритным коэффициентом $g = 1,25$. В соответствии с формулой (7), где вместо частоты моделирования $f_{\text{анс}}$ была использована частота реального измерения $f_{\text{изм}}$, был рассчитан коэффициент коррекции геометрической дисперсии скорости звука $\beta \approx 0,78$. Полученное экспериментальное значение коэффициента коррекции хорошо коррелирует с рассчитанным выше теоретическим значением ($\beta \approx 0,77$).

ВЫВОДЫ

В статье изложена методика теоретического определения коэффициента коррекции геометрической дисперсии скорости звука β в компактных изделиях из бетона с квадратным сечением, а также методика экспериментального измерения корректирующего коэффициента β . Предложенные методики были получены для компактных изделий с габаритным коэффициентом $g = 1,25$, однако они справедливы для всех компактных изделий с квадратным сечением с иными соотношениями габаритов $g = D/H$.

Разработанные методики определения коэффициента коррекции геометрической дисперсии скорости звука β позволяют рассчитать его значение для любого компактного изделия с квадратным сечением, что, в свою очередь, позволяет построить дисперсионную зависимость коэффициента β от габаритного коэффициента g .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолов И.Н., Алёшин Н.П., Потапов А.И. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля. Практ. пособие / Под ред. В.В. Сухорукова. М.: Высш. шк., 1991. 283 с.
2. Lin Y.C., Su W.C. Use of stress waves for determining the depth of surface-opening cracks in concrete structures // *ACI Materials Journal*. 1996. V. 93. No. 5. P. 494—505.
3. Zhu J., Popovics J.S. Non-contact detection of surface waves in concrete using an air-coupled sensor // *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*. 2001. V. 20B. P. 1261—1268.
4. Hlavac Z. Detection of crack in a concrete element by impact-echo method // *Ultragarsas (Ultrasound)*. 2009. V. 64. No. 2. P. 12—16.
5. 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.
6. Sansalone M., Streett W.B. Impact-echo: nondestructive testing of concrete and masonry. Bullbrier Press, Jersey Shore, PA. 1997.
7. ASTM C1383-15. Standard test method for measuring the P-wave speed and the thickness of concrete plates using the impact-echo method.
8. FPrimeC Solutions Inc.: <https://www.fprimec.com>
9. Качанов В.К., Соколов И.В., Авраменко С.Л. Проблемы акустического контроля крупногабаритных строительных конструкций из бетона // *Дефектоскопия*. 2008. № 12. С. 12—22.
10. 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.
11. Качанов В.К., Авраменко С.Л., Концов Р.В. Корреляционный мультипликативный метод измерения скорости распространения акустических колебаний в крупногабаритных изделиях из бетона // *Измерительная техника*. 2009. № 11. С. 52—54.

12. *Carino N.J.* The impact-echo method: an overview // Structures Congress & Exposition. 2001. P. 18.
 13. *Викторов И.А.* Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 286 с.
 14. *Шутилов В.А.* Основы физики ультразвука. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 280 с.
 15. *Carino N.J.* Impact-echo: the fundamentals // Non-Destructive Testing in Civil Engineering: Ultrasound & Surface Waves. 2015.
 16. *Gibson A., Popovics J.A.* Lamb wave basis for impact-echo method analysis // Journal of Engineering Mechanics (ASCE). 2005. V. 131. No. 4. P. 438—443.
 17. *Рэлей.* Теория звука. Т. 1. М.: ГИТТЛ, 1955. 503 с.
 18. ANSYS Mechanical APDL Structural Analysis Guide. Release 15. 2013. P. 498.
-