

высоконапорных гидротехнических сооружений и их основания при статических и динамических нагрузках: тезисы докладов. – М.: МГМИ, 1972. – С. 313–322.

2. Ничипорович А. А. Плотины из местных материалов. – М.: Стройиздат, 1973. – 320 с.

3. Поспелов В. Н. Способы расчета устойчивости земляных откосов с учетом пространственности их работы: Методы определения напряженного состояния и устойчивости высоконапорных гидротехнических сооружений и их оснований при статических и динамических нагрузках: тезисы докладов. – М.: МГМИ, 1972. – С. 305–312.

4. Бахтин Б. М. Совершенствование методики исследования сейсмостойкости

гидротехнических сооружений на моделях // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. – 1983. – № 6. – С. 98–103.

5. Бахтин Б. М. Особенности динамической работы плотины из армированного грунта при сейсмических воздействиях // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2001. – № 12. – С. 56–64.

6. Окамото Ш. Сейсмостойкость инженерных сооружений (перевод с англ.). – М.: Стройиздат, 1980. – 342 с.

Материал поступил в редакцию 25.10.11.

*Бахтин Бронислав Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Гидротехнические сооружения»
Тел. 8 (499) 976-24-60*

УДК 502/504:627.8

Б. М. БАХТИН

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

ОПЕРАТИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ ИСКУССТВЕННЫХ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Испытания моделей бетонных гидротехнических сооружений на некальных основаниях или сооружений, взаимодействующих с грунтовыми засыпками, требуют адекватного воспроизведения свойств модельных грунтов. В работе приводятся сведения о возможных направлениях проектирования искусственных грунтов на основе мелкозернистого песка. Описаны оперативные методы определения свойств таких материалов, ускоряющие и удешевляющие работу по подбору композиции с заданными характеристиками.

Бетонные гидротехнические сооружения, грунтовые засыпки, модельные грунты, проектирование искусственных грунтов.

Tests of models of concrete hydraulic technical structures on several bases or structures interacting with soil layers require the adequate reproduction of model soils properties. In the work there are given the data about possible directions of designing artificial soils on the basis of fine-grained sand. Operative methods are described for determinations of properties of such materials which accelerate and reduce the price of the work on selection of the composition with the given characteristics.

Concrete hydraulic structures, soil layers, model grounds, designing of artificial soils.

Сооружения, негрунтовые конструкции которых находятся в непрерывном взаимодействии с грунтовой средой, состав-

ляя с ней единое целое – подпорные стенки, трубы под насыпями, ячеистые, свайные и армогрунтовые конструк-

ции, имеют широкое распространение в практике гидротехнического, промышленно-гражданского и транспортного строительства.

Отличительной чертой таких сооружений и конструкций является весьма сложный характер взаимодействия с окружающим грунтом, масса которого многократно превышает массу негрунтового сооружения или его элемента. Это затрудняет математическое описание их поведения, особенно при динамических воздействиях. Существует, например, точка зрения, согласно которой эти конструкции следует рассматривать как системы, обладающие собственными динамическими характеристиками, определяющими характер движения. Влияние грунта при таком подходе учитывают в виде некоторой присоединенной массы, колеблющейся вместе с конструкцией. Согласно другой точке зрения, определяющим фактором в динамическом взаимодействии конструкции с грунтом является последний. Именно колебания массива грунта, как динамической системы, определяют характер движения конструкции. Эти два подхода дают принципиально разные результаты определения динамических нагрузок на сооружение как по характеру распределения, так и по величинам.

Различия во взглядах на характер взаимодействия между негрунтовыми элементами сооружения и окружающим их грунтом свидетельствуют о недостаточной изученности физической природы этого явления, указывая на необходимость продолжения соответствующих исследований. Очевидно, наиболее репрезентативными были бы результаты изучения поведения реальных сооружений в натуре, что, однако, является весьма сложным и дорогостоящим.

Достаточно надежными, хорошо отражающими физику явления, являются результаты исследований поведения физических моделей при условии адекватного воспроизведения физико-механических характеристик материалов конструкции и грунта и сил взаимодействия на их контактах. Наиболее полно оно выполняется при использовании для изготовления моделей натуральных материалов. Это позволяет обеспечить и подобие сил взаимодействия,

однако лишь при обеспечении подобия напряженно-деформированного состояния (далее НДС) всех элементов сооружения от статических и динамических нагрузок и воздействий, для чего необходимо соблюдение условия

$$\alpha_g = \frac{\alpha_\varepsilon \alpha_E}{\alpha_1 \alpha_\rho}, \quad (1)$$

а при $\alpha_\varepsilon = \alpha_E = \alpha_\rho$, когда материалы натуре и модели идентичны,

$$\alpha_g = \frac{1}{\alpha_1}, \quad (2)$$

где α_g ; α_1 ; α_ε ; α_E ; α_ρ – масштабы соответственно ускорений, линейных размеров, относительных деформаций, модулей деформации (упругости) и плотностей.

При такой постановке задачи и линейном масштабе (например, $\alpha_1 = 20$ ускорения) и ускорения силы тяжести на модели должны быть в двадцать раз выше, чем натурные. В этом случае проводить эксперимент необходимо либо в искусственном гравитационном поле, либо создавать требуемое НДС сооружения от статических нагрузок (собственный вес, гидростатическое давление) приложением внешних, не массовых сил.

С учетом сказанного становится понятным, что адекватное воспроизведение на малой модели, выполненной из натуральных материалов, пространственно-временных процессов, протекающих в реальном сооружении рассматриваемого вида, невозможно. Отказ от использования натуральных материалов может позволить проведение эксперимента в естественном (гравитационном) поле ускорений, но требует создания специальных материалов с низкими деформативными и прочностными характеристиками и повышенной плотностью. Работы, выполненные в нашей стране и за рубежом в семидесятых – восьмидесятых годах прошлого столетия позволили создать хрупкие материалы малой прочности, моделирующие свойства бетона, и оперативные методы определения их физико-механических характеристик. Некоторые из них приведены в работе [1].

Использование таких материалов при моделировании бетонных конструкций, взаимодействующих с грунтовым массивом, вызывает необходимость в материалах, которые позволяют адекватно

воспроизвести свойства грунта. Они должны быть более тяжелыми, чем грунты природные, с меньшими значениями удельного сцепления и скоростей распространения сейсмических волн при сохранении величин углов внутреннего и контактного трения и коэффициента Пуассона. Задача создания связных искусственных модельных грунтов весьма сложна и до настоящего времени надежного решения не имеет. Моделирование грунтов сыпучих более просто. В проводимых автором экспериментах основой таких грунтов служил мелкозернистый песок среднего диаметра ($d_{50} = 0,21$ мм) с коэффициентом неоднородности $\eta = 2$. При плотности $\rho = 1,6$ т/м³ угол внутреннего трения, коэффициент Пуассона и скорость продольной волны в нем составляли соответственно около 34°; 0,3; 200 м/с. Уменьшение скорости сейсмических волн в грунте искусственном достигалось добавлением к песку резиновой крошки. Нужно заметить, что этот компонент оказывает влияние и на величину угла внутреннего трения материала. С увеличением содержания резины в смеси от нуля до 3 % угол ϕ плавно растет до 38° и уже при трехпроцентном содержании именно резиновая крошка определяет величину этого параметра: с увеличением доли резины дальнейшего его роста не происходит. Естественно, по мере увеличения содержания резиновой крошки в составе искусственного грунта снижается и его плотность ρ , и скорость распространения продольной сейсмической волны v_p . На рис. 1 приведены графики зависимости указанных характеристик резино-песчаного грунта от процентного содержания (P %) в нем резиновой крошки (% от веса песка). Зависимость $\rho = f(P \%)$ близка к линейной, что позволяет легко подбирать смеси любой плотности в указанном диапазоне ее изменения, приготовив лишь два пробных состава.

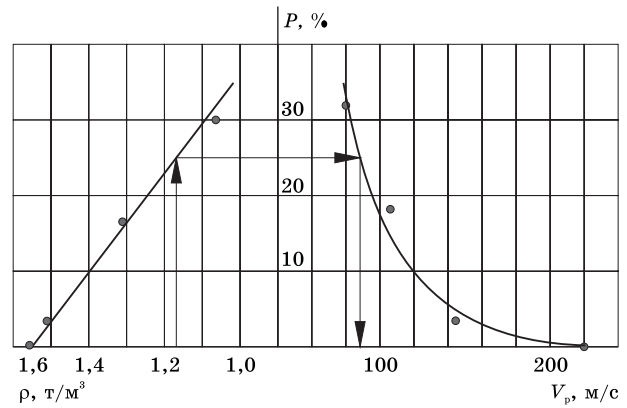


Рис. 1. Зависимость плотности искусственного грунта (песок + резиновая крошка) и скорости распространения продольной сейсмической волны в нем от процентного содержания резиновой крошки

Очевидным недостатком таких материалов является относительно малая плотность. При необходимости воспроизвести соотношение массовых сил в бетонных конструкциях и взаимодействующем с ними грунте величина плотности последнего должна быть, как минимум, выше 1,7 т/м³, если плотность модельного материала бетонного объекта 2,4 т/м³. Для регулирования этого параметра может быть использован свинцовый порошок с плотностью в насыпном теле около 6,0 т/м³, добавка которого к резино-песчаной смеси позволяет существенно ее утяжелить. Однако такие смеси являются нестабильными. При укладке, уплотнении и в ходе эксперимента происходит их расслоение. Тяжелые и весьма мелкие частицы свинца, проникая через поры грунта, сосредотачиваются в нижних слоях модельного массива. Для обеспечения равномерности свойств искусственного грунта по всему объему использовалась добавка минерального масла, устраняющего эффект просыпаемости свинцовой фракции. Характеристики одного из утяжеленных песчано-свинцовых (П:С) составов с добавкой стабилизатора – масла (М) приведены в таблице.

Физико-механические характеристики искусственного грунта

Содержание (весовые части)			Характеристика			
П	С	М	Плотность ρ , т/м ³	Скорость продольной волны v_p , м/с	Угол внутреннего трения ϕ , град	Удельное сцепление c , кгс/см ²
1	0,45	0,045	1,97	114,0	31,2	~ 0,07 ¹ ~ 0,008 ²

Примечание: 1 – по результатам сдвиговых испытаний; 2 – по высоте «свободного» откоса.

Из этих данных видно, что добавка свинца к песку, находящемуся в воздушно-сухом состоянии с насыпной плотностью $\rho = 1,52 \text{ т/м}^3$, существенно, более чем на четверть, утяжелила искусственный грунт.

Испытания песка и смеси с указанным соотношением компонентов, которые проводились в сдвиговом приборе по стандартной методике, показали, что добавки свинца и масла практически не повлияли на величину угла внутреннего трения материала. Выяснилось также, что песчано-свинцовая смесь с добавкой масла, в отличие от песка, обладает значительной связностью ($c \approx 0,07 \text{ кгс/см}^2$). Видимо, масло, обволакивая частицы свинца и песчинки, обуславливает возникновение в этой мелкопористой среде капиллярных сил, проявляющихся как силы сцепления. Это соображение подтверждается и фактом возникновения сил кажущегося сцепления в этом же песке при его увлажнении [2]. Нужно заметить, что сама величина удельного сцепления, полученная по результатам сдвиговых испытаний, вызывает большие сомнения. Если верить этим результатам, такой материал должен держать свободный вертикальный откос высотой около 1 м, а это никак не соответствует опыту работы с ним. Можно предположить, что указанное противоречие вызвано либо неточностью определения момента сдвига, либо некоторой нелинейностью работы искусственного материала при малых значениях действующих нагрузок.

Из сказанного ясно, что создание материалов для моделирования сооружений, где бетонные конструкции взаимодействуют с грунтами, является достаточно сложной задачей. В процессе ее решения, на основе опыта и интуиции, намечают ряд пробных составов и определяют их свойства, отталкиваясь от которых уточняют содержание компонентов в смесях. Этот цикл повторяют до тех пор, пока характеристики полученных материалов не приблизятся в достаточной степени к величинам, требуемым по условиям подобия. Очевидно, наибольшие трудности возникают в ходе определения физико-механических характеристик, и прежде всего потому, что применение привычных методик предполагает необходимость испытания значительного числа образцов. Последнее

обстоятельство особенно неудобно в ходе перебора пробных составов, когда важна экономия времени, а иногда и достаточно дорогих и дефицитных (металлических порошков, резиновой крошки и т.п.) компонентов.

Ясно, что на начальном этапе процесса подбора особую роль приобретает оперативность определения характеристик каждой из композиций, даже в ущерб точности, если, конечно, ошибка в определении того или иного параметра лежит в пределах допустимых значений. При подборе модельных грунтовых материалов на этом этапе возникает вопрос быстрой оценки угла внутреннего трения и характеристик сцепления. Традиционные методы испытаний, обеспечивая большую или меньшую точность определения указанных характеристик, требуют значительных затрат времени.

На начальном этапе подбора угол внутреннего трения φ можно оценивать по углу свободного откоса с помощью известных методов и приборов. Точность определения угла φ здесь невелика, однако позволяет оценить тенденции влияния того или иного компонента в составе изучаемого материала и наметить направление дальнейшего его изменения. К сожалению, указанные методы не позволяют оценить величину удельного сцепления модельного грунта, которое при испытаниях малых моделей грунтовых сооружений имеет немаловажное значение. В реальных сооружениях из сыпучих грунтов роль сцепления в обеспечении устойчивости объекта невелика, и учету этого фактора большого значения обычно не придают. Однако при проведении исследований на малоразмерных моделях таких объектов удельный вес сил сцепления в суммарном сопротивлении сдвигающим усилиям существенно возрастает – пропорционально квадрату линейного масштаба. Неверный учет этого фактора может привести к неверной трактовке результатов эксперимента, исказить оценку несущей способности грунтового или армогрунтового сооружения. Достаточно быстро сцепление модельного грунта c может быть определено по высоте его свободного вертикального откоса $h_{\text{тр}}$, если известны значения плотности ρ и угла внутреннего трения φ :

$$c = \frac{1 - \sin\varphi}{2 \cos\varphi} \cdot \rho g h_{\text{гр}} = K(\varphi) \rho g h_{\text{гр}}. \quad (3)$$

Возникает вопрос о точности определения этого параметра в условиях приближенного метода определения угла внутреннего трения. Расчеты показывают, что при ошибке определения угла φ в широком диапазоне его значений ($\varphi = 28^\circ \dots 36^\circ$) погрешность в определении удельного сцепления грунта составляет не более 20 %, а в диапазоне углов $\varphi = 30^\circ \dots 34^\circ$ наиболее вероятном для грунтов, не содержащих резиновой крошки, эта погрешность не превысит 6 %.

Из этих данных видно, что метод свободного вертикального откоса позволяет достаточно точно определить величину удельного сцепления для модельного грунтового материала как на начальной стадии его создания, так и при детальных исследованиях материалов, приближающихся по своим свойствам к требуемому по условиям моделирования эталону. Таким образом, испытания в сдвиговом приборе для определения угла внутреннего трения в сочетании с методом свободного вертикального откоса позволяют с достаточной степенью достоверности определять сдвиговые характеристики модельных грунтовых материалов.

Определение сцепления указанным методом удобно проводить, используя открытый сверху контейнер с шарнирно-закрепленной сверху, откидывающейся вертикальной стенкой (рис. 2). Для испытаний грунтов с $\varphi = 30^\circ \dots 34^\circ$ и $c \leq 0,02$ кгс/см² высота h такого контейнера составляет около 0,5 м. Его ширина B при этом должна быть больше ширины по верху призмы обрушения: $b = h \cdot \text{tg}(45^\circ - \varphi/2)$ (запас $B = 1,5b$, т. е. около 45 см). Длина L контейнера определяется условием отсутствия влияния сил трения по боковым его стенкам на результаты испытаний. По [3] и результатам проведенного опыта это достигается при $L/h \geq 4$.

Указанные размеры контейнера определены из условия испытаний грунта с $\varphi = 30^\circ$ и $c = 0,02$ кгс/см². Для грунтов меньшей связности и с большим углом φ они могут быть уменьшены с целью экономии компонентов исследуемой смеси путем установки в контейнер сменных элементов – систем перегородок, ограни-

чивающих величину испытываемого массива. Заполняя контейнер разными по высоте слоями грунта и откидывая осторожно переднюю стенку, можно достаточно точно определить предельную высоту свободного вертикального откоса и величину удельного сцепления грунта по зависимости (3).

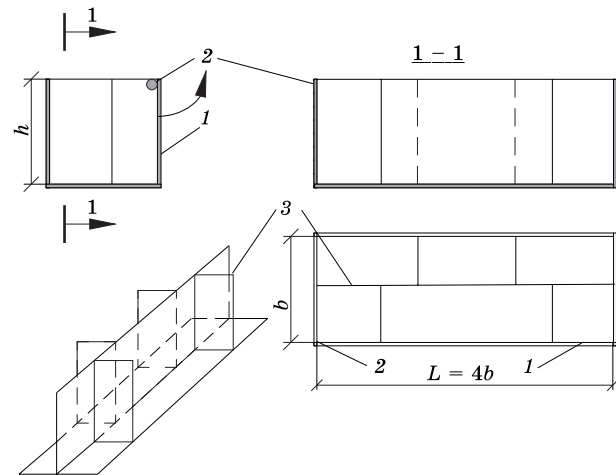


Рис. 2. Схема устройства для оперативного определения удельного сцепления искусственных модельных грунтов: 1 – откидная крышка; 2 – шарнир; 3 – сменный элемент

Изучение динамического поведения жестких конструкций сооружений, взаимодействующих с грунтами, требует воспроизведения динамических модулей упругости E_d или сдвига G_d , акустических жесткостей $\rho \times v_{p,s}$, длин сейсмических волн λ , коэффициентов Пуассона μ и поглощения энергии ψ . Первые четыре из перечисленных величин для грунтовых материалов просто найти, если известны скорости распространения сейсмических волн (продольной v_p и поперечной v_s либо поверхностных v_{RL}):

$$E_d = 2(1 + \mu)G_d = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \rho v_p^2; \quad (4)$$

$$G_d = \rho v_s^2; \quad (5)$$

$$v_{RL} \approx 0,93 v_s; \quad (6)$$

$$\mu = 0,5 - \frac{v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)}. \quad (7)$$

Использование методики определения скоростей сейсмических волн, применяемой в натурных исследованиях, как показывает опыт, требует изготовления модельного грунтового массива больших размеров. Очевидно, наибольшие сложности

с определением скоростей сейсмических волн возникают на стадии подбора искусственного модельного грунта. На этом этапе указанные характеристики удобно определять с помощью устройства, разработанного в лаборатории сейсмостойкости ФГБОУ ВПО МГУП [4]. Схема его приведена на рис. 3. Устройство представляет емкость 1 полусферической формы, выполненную из жесткого материала, скорость распространения сейсмических волн в котором на 1...2 порядка выше, чем в испытуемом грунте. В нижней части полусферы, по ее оси, установлен акселерометр 2, там же смонтировано устройство 3, наносящее удары по поверхности полусферы с заданной частотой.

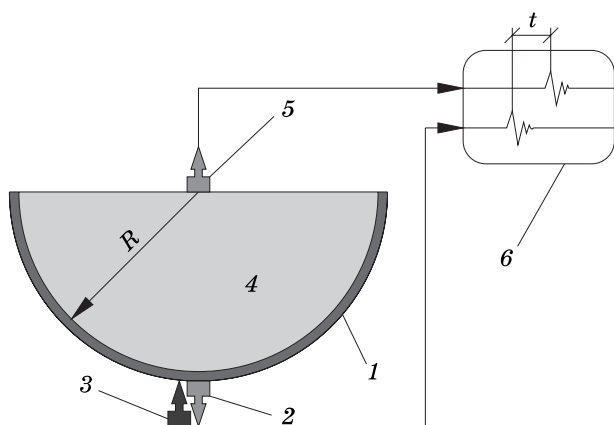


Рис. 3. Схема устройства для оперативного определения скоростей сейсмических волн в модельных грунтах: 1 – емкость; 2, 5 – акселерометры; 3 – ударное устройство; 4 – грунт; 6 – регистрирующее устройство

Грунтовый материал 4, свойства которого требуется изучить, укладывают в емкость вровень с ее краями. На поверхности грунта, в центре круга, размещают второй акселерометр 5, регистрирующий колебания грунтового массива. Сигналы от датчиков 2 и 5 выведены на регистрирующее устройство 6. При включении ударника 3 в жестком материале емкости-полусферы возбуждается волна удара, распространяющаяся с большей, по сравнению с волной в грунте, скоростью и достигающая всех точек внутренней поверхности полусферы практически одновременно. Таким образом, каждая точка этой поверхности становится источником энергии, которая излучается в грунтовой массив в радиальном направлении. Энергия волн,

генерируемых в грунте на внутренней поверхности емкости-излучателя, приходя к центру полусферы, концентрируется, вызывая интенсивные колебания грунта, что дает возможность надежной регистрации сигнала от акселерометра-приемника 5 регистрирующим устройством 6. Разница во времени между моментами вступления сигналов датчиков 2 и 5 представляет время пробега t продольной волны от каждой точки внутренней поверхности полусферы-излучателя до ее геометрического центра. При радиусе полусферы R скорость волны составляет: $v_p = R / t$.

На рис. 4 приведен пример записи сигналов этих датчиков при испытании сухого мелкозернистого песка с плотностью $1,53 \text{ т/м}^3$. Радиус емкости-излучателя составляет 185 мм. Емкость-излучатель выполнен из гипсового раствора с модулем упругости 8000 МПа и скоростью распространения продольной волны около 2800 м/с. Все устройство размещено на платформе весов, что позволяет, взвешивая его до и после укладки грунта, легко определять плотность последнего.

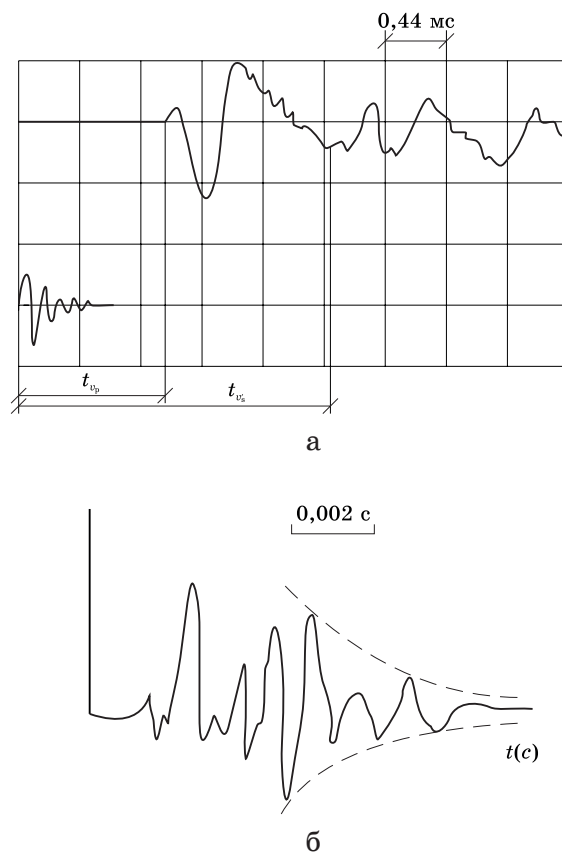


Рис. 4. Примеры записей ускорения колебаний при распространении волн в грунте (испытания по схеме)

Время пробега продольной волны от поверхности полусферы до ее центра, найденное как время запаздывания сигнала датчика 5 относительно сигнала 2, составляет 0,001 с (см. рис. 4а). Скорость продольной волны в этом случае равна 185 м/с. Момент прихода в точку регистрации поперечной волны определяют по началу регулярных, относительно слабо затухающих колебаний на записи процесса. В нашем случае этот момент оказался сдвинутым относительно момента возбуждения волны в полусфере-излучателе примерно на 0,0019 с. Таким образом, скорость поперечной волны для этого грунта оказалась равной 95 м/с. Имея величины скоростей сейсмических волн, по зависимости (7) легко получить значение коэффициента Пуассона: $\mu = 0,31$.

Запись колебаний грунта позволяет определить параметры их затухания, характеризующие поглощение и рассеяние энергии волн в массиве. Так, среднее значение логарифмического декремента колебаний для нашего случая составляет 0,22, а коэффициент поглощения – около 0,45 (см. рис. 4б).

Выводы

Описанные методики и устройства применялись на стадии подбора искусственных резино-песчаных и свинцово-песчаных модельных материалов. После формирования грунтовых массивов

модельных объектов для каждого из них выполнялись измерения скорости продольной волны по традиционной методике. Во всех случаях расхождения в величинах скоростей этих волн, определенных разными методами, не превышали 10 %.

1. **Бахтин Б. М.** Оперативное определение свойств хрупких модельных материалов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 1995. – № 7–8. – С. 129–136.

2. **Иванов П. Л.** Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1991. – 447 с.

3. **Соколов А. Д.** Влияние трения по боковым граням призмы обрушения на величину активного давления грунта: труды МГМИ. – М.: МГМИ, 1976. – Т. 49. – С. 108–115.

4. Устройство для определения скорости упругих колебаний в материале пробы грунта: а. с. № 1332246 / В. И. Думенко, Б. М. Бахтин, В. П. Шарков. – Бюл. № 31. – 1987.

Материал поступил в редакцию 25.10.11.

Бахтин Бронислав Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Гидротехнические сооружения»

Тел. 8 (499) 976-24-60