

УДК 624.131.4

Е.А. Вознесенский¹, Е.С. Кушнарева², В.В. Фуникова³

ПРИРОДА И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В ГРУНТАХ

Рассмотрены основные закономерности поглощения волн напряжений в дисперсных и полускальных грунтах. Установлены два пороговых уровня деформации, при достижении которых происходят качественные изменения коэффициента поглощения: в области относительных деформаций до 10^{-4} его можно считать постоянным и обусловленным неидеальной упругостью и вязкими потерями; после преодоления этого порога деформаций наблюдается монотонное увеличение поглощения в результате возникновения начальных пластических деформаций грунта; в области же сдвиговых деформаций средней величины наблюдается снижение темпа увеличения коэффициента поглощения при относительных деформациях сдвига выше 0,002, что обусловлено резким снижением доли поглощения на неидеальную упругость грунта и теплопотери по мере деградации структурных связей.

Ключевые слова: поглощение, динамический модуль сдвига, сдвиговые деформации, потери энергии, резонансная колонка, крутильный сдвиг, динамическое трехосное сжатие, гистерезис.

Basic regularities of damping in soils and soft rocks are discussed. Two threshold shear strain levels marking principal changes in damping ratio are identified: in shear strain range below 10^{-4} it can be considered constant and caused by non-ideal elasticity and viscous losses. Beyond this threshold damping monotonically increases due to the initial plastic strains, whereas in the average strain range above 0,002 the rate of damping development decreases because of abrupt reduction of the losses for non-ideal elasticity and heat transfer in connection of degradation of structural bonds.

Key words: damping, dynamic shear modulus, shear strains, energy loss, resonant column, torsional shear, hysteresis, dynamic triaxial testing.

Введение. Волны напряжений, распространяющиеся в грунтах и вообще в земной коре, вне зависимости от их типа и происхождения принято называть сейсмическими. С удалением от источника часть энергии волны теряется, и амплитуда напряжений на ее фронте снижается. Это явление называется затуханием. В классической теории упругости полагается, что распространение сейсмических волн в идеально упругих однородных средах не сопровождается необратимым превращением упругой энергии в энергию других видов, например в тепловую; упругие процессы в таких системах происходят адиабатически. Убывание плотности потока упругой энергии в таких средах пропорционально увеличению поверхности волнового фронта; происходит только чисто геометрическое «расхождение» фронта волны [Ризниченко, 1956] с удалением от источника, что означает снижение удельной энергии волны на единицу площади ее фронта.

Однако грунты как многокомпонентные системы, состоящие из твердого, жидкого и газового компонентов, а также биотической составляющей,

не являются однородными упругими средами, а представляют собой гетерогенные среды, при распространении волн напряжений в них происходит потеря энергии не только за счет геометрического расхождения волнового фронта, но и отражение, преломление на границах, рассеяние на различного рода неоднородностях, имеющих в массиве горных пород, и поглощение — как за счет неидеальной упругости, так и вязкости среды, а также релаксации напряжений. В результате этого гетерогенная среда поглощает упругую энергию, а зависимость убывания упругих волн с расстоянием определяется размерами неоднородностей, физико-механическими свойствами отдельных компонентов, частотой колебаний и др. [Карус, 1958]. В соответствии с различными механизмами потерь энергии волны выделяются и разные виды затухания:

1) расхождение (а также геометрическое или радиационное затухание), обусловленное уменьшением удельной энергии на единицу площади фронта волны в связи с ее увеличением по мере удаления от источника;

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, профессор, докт. геол.-минер. н., e-mail: eugene@geol.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, науч. с., канд. геол.-минер. н., e-mail: kushlana@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, ст. науч. с., канд. геол.-минер. н., e-mail: funikova@geol.msu.ru

2) рассеяние на различных неоднородностях среды, приводящее к уменьшению энергии волны в конкретном направлении. Рассеяние волн на любом препятствии зависит от его формы и размеров, а также от плотности и сжимаемости вещества препятствия. Если сжимаемость и плотность неоднородности такие же, как и у остальной среды, то она не вызовет рассеяния, каковы бы ни были ее размеры и форма;

3) собственно поглощение (или гистерезисное затухание), обусловленное затратами энергии на пластические, нелинейно-упругие деформации и тепловые потери.

Встречающееся в специальной литературе понятие «эквивалентное затухание» подразумевает совместный учет эффектов рассеяния и поглощения. Обычно в реальной толще грунтов все виды затухания проявляются одновременно, но в зависимости от состава и свойств самого грунта, а также типа и особенно частоты бегущей волны соотношение между ними может существенно варьировать. Различна их роль и на разном удалении от источника, поскольку затухание вследствие расхождения происходит по степенному закону, а вследствие поглощения — по экспоненциальному.

Первые работы, посвященные выяснению природы поглощения сейсмических волн, появились в начале XX в. [Голицин, 1912; Jeffreys, 1917]. Впоследствии были предложены концепции, различно трактующие механизм поглощения упругих волн. Теория вязкого трения основана на свойстве неидеально упругих (вязких тел) оказывать сопротивление при перемещении одной части среды относительно другой [Ландау, Лившиц, 1954]. Концепция упругого последействия основана на предположении Л. Больцмана, согласно которому деформация зависит не только от напряжения в данный момент времени, но и во все предшествующие моменты времени, т.е. материал обладает памятью; эту концепцию активно развивал Б.В. Дерягин (1931). Я.И. Френкель (1944) предложил теорию распространения сейсмических волн в водонасыщенных осадочных породах, согласно которой в результате трения между твердой и жидкой фазами может происходить переход упругой энергии в другие ее виды, в частности, в электрическую. В последующем М. Био [Biot, 1954] усовершенствовал теорию поглощения в насыщенных пористых средах, также рассматривая в качестве основного механизма, приводящего к потерям энергии, вязкое трение между фазами.

При разнообразии горных пород и условий их залегания более или менее адекватными могут оказаться разные модели механизмов поглощения в них волн напряжений. Так, классические теории поглощения для моделей сплошной среды исходят из представлений о реальной среде как о сплошном твердом теле, в котором наряду с чистой упругостью (описываемой законом Гука) предполагается некоторый механизм

диссипации сейсмической энергии, связанный с вязкостью, внутренним трением (классическое поглощение) и с упругим последействием (релаксационное поглощение). Математический аппарат этих теорий повторяет ход решения задачи теории упругости, а физические связи между приложенными напряжениями и деформациями задаются уравнениями состояния среды. Механизм поглощения упруго-вязких сред, в которых к упругим добавляются напряжения, обусловленные вязкостью и внутренним трением, описывается уравнениями состояния тел Кельвина—Фохта, Максвелла (для случая релаксации напряжений и проявления остаточных деформаций в теле) и стандартного линейного тела, сочетающего в себе комбинацию первых двух [Коган, 1966].

Потеря энергии при классическом поглощении происходит за счет: а) вязких потерь, обусловленных сдвиговыми напряжениями, возникающими при скольжении слоев жидкости друг по другу и пропорциональными скорости сдвиговой деформации среды; действие этих напряжений выравнивает неравномерность скорости между слоями; б) «внешнего» (кулоновского) трения — диссипативные силы возникают при трении колеблющейся среды о неподвижную границу (в том числе и между частицами грунта, в механике грунтов классическое поглощение традиционно называют внутренним трением). Для среды с упругим последействием релаксационное поглощение обусловлено локальными механизмами объемной вязкости и теплоизлучения. Объемная вязкость связана с возникновением частотно-зависимой добавки к давлению (по сравнению со статическими условиями) в результате отставания последнего по фазе от сжатия, если время релаксации напряжений не очень мало по сравнению с периодом волны. Потери на теплопроводность связаны с независимым теплоизлучением каждого элемента дискретной среды, так как изменение объема тела сопровождается изменением его температуры. В результате возникают необратимые процессы переноса тепла.

Затухание сейсмических импульсов с расстоянием, не связанное с отражением и преломлением на границах, т.е. собственно поглощение, вводится при решении прямых задач в виде экспоненциального множителя $e^{-\alpha(f)r}$, где α — показатель поглощения, зависящий от частоты f ; r — расстояние, пробегаемое волной. Введение экспоненциального множителя не является строго обоснованным теоретически и осуществляется только по аналогии с колебательными системами, которые описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями. Однако для приближенного описания реально наблюдаемого поглощения введение экспоненциального множителя оправдано, его можно рассматривать одновременно как определение эффективного значения параметра поглощения [Пузырев, 1997]. В зависимости от выбора идеализированной модели среды распространения волн показатель поглощения может быть пропорцио-

нален частоте (для среды с упругим последствием), пропорционален квадрату частоты (для упруго-вязкой среды), а для случая двухфазной несплошной среды, состоящей из твердых частиц и воды, заполняющей поры в скелете (модель Био), пропорционален квадратному корню из частоты (для продольных волн) [Красников, 1970].

Таким образом, в современной литературе нет единой теории поглощения волн, которая достаточно полно и с учетом всех физических явлений могла бы объяснить закономерности поглощения сейсмических волн в различных породах. Анализ и обобщение опубликованных разными авторами [Ишихара, 2006; 1980; Kim, Novak, 1981; Hardin et al., 1972; Sagaseta et al., 1991; Lanzo et al., 2009; Vucetic, Dobry, 1991; Кондратьев, 1986] данных позволяет констатировать следующее.

1) природа поглощения в качестве одного из компонентов затухания волн напряжений в грунтах изучена недостаточно, однако в целом можно считать установленным, что его причинами являются кулоновское («внешнее») трение, вязкие потери (внутреннее трение) и релаксационное теплоизлучение (объемная вязкость). Наиболее употребительный и удобный для практического применения количественный показатель этих эффектов — безразмерный коэффициент поглощения (D , %), представляющий собой отношение удельной рассеянной энергии к общей величине работы общих деформаций за цикл воздействия. Величина коэффициента поглощения характеризуется долей (в %) его критического значения. При поглощении, равном критическому, колебания не могут возникнуть (работа общих деформаций равна рассеянной энергии). Этой величиной мы и будем пользоваться в дальнейшем при характеристике поглощающих свойств грунта как материала (в отсутствие эффектов рассеяния и расхождения);

2) на сегодняшний день можно считать установленными следующие факты:

— величина коэффициента поглощения зависит от частоты волны, однако вид этой зависимости неоднозначен и, скорее всего, определяется шириной частотного диапазона; в узком диапазоне частот увеличение поглощения с частотой можно считать линейным;

— в наибольшей степени величина коэффициента поглощения зависит от уровня возникающих в грунте деформаций, нелинейно увеличиваясь с ростом последних;

— поглощение в целом снижается с уменьшением влажности и дисперсности грунтов и с повышением сжимающих напряжений (и глубины залегания);

3) противоречивы и неоднозначны данные разных авторов о влиянии на поглощение пористости и истории нагружения, в частности длительности действия сжимающих напряжений. Недостаточно внимания в опубликованных работах уделено исследованию влияния преобладающего типа структурных связей

на поглощение с учетом разной чувствительности грунтов к деформациям различного уровня.

Причины противоречивости выводов исследователей заключаются, во-первых, в недостаточной изученности явления в целом, во-вторых, в разнородности исследованных ими грунтов и их разном объеме и, в-третьих, в существенном влиянии неучтенных пока факторов, затрудняющем однозначную и корректную трактовку полученных результатов. Чрезвычайно большой интерес с точки зрения понимания природы и закономерностей проявления поглощения имеет отмеченная рядом автором взаимосвязь заметного изменения его показателей на границах разных диапазонов деформирования — линейного, нелинейно-упругого и существенно пластического.

Методика экспериментальных исследований.

Рассмотрены следующие лабораторные методы исследования динамических характеристик грунтов — динамического модуля сдвига (G) и коэффициента поглощения энергии воздействия (D): 1) малоамплитудные динамические испытания на резонансной колонке при деформациях сдвига до 0,1%; 2) динамический крутильный сдвиг при сдвиговых деформациях свыше 0,1%; 3) метод динамического трехосного сжатия (для сравнения с результатами, полученными на резонансной колонке, для оценки динамической устойчивости грунтов при циклических нагрузках).

В целом методика испытаний на резонансной колонке регламентируется стандартом ASTM D 4015-92 (2000). Резонансная колонка представляет собой лабораторное оборудование для определения динамических свойств грунтов в условиях малоамплитудных динамических нагрузок любого происхождения (землетрясения, движущийся транспорт, работа промышленного и строительного оборудования). Эта установка позволяет получить показатели динамических характеристик в диапазоне малых и очень малых деформаций сдвига (10^{-4} – 10^{-3} %), соответствующих упругому и отчасти упругопластическому деформированию.

Выделяют две схемы проведения испытаний на резонансной колонке — в режиме вынужденных крутильных колебаний для определения динамического модуля сдвига грунта (G) и в режиме свободных колебаний для определения коэффициента поглощения энергии воздействия грунтом (D). Для оценки деградации G и роста D с увеличением деформации проводят динамические испытания грунтов в режиме крутильного сдвига при значительных сдвиговых деформациях (свыше 0,1%), которые определяются возможностями аппаратуры.

Испытания проводились на резонансной колонке TSH-100 производства компании «Geotechnical Consulting & Testing Systems» (США). Метод основан на теории распространения колебательного движения в упругом стержне, нижний торец которого закреплен, и деформации сдвига на нем равны нулю. Грунт рассматривается как модель вязко-упругих тел Кельвина—Фохта.

1. **Методика проведения испытаний на резонансной колонке TSH-100.** Каждый эксперимент проводится в несколько последовательных стадий начиная с подготовки образцов. Создают образцы цилиндрической формы (диаметром 5 см и высотой 10 см) как нарушенного сложения (песчаные) методом сухой послойной отсыпки, так и ненарушенного сложения (глинистые). Подробно методика подготовки образцов описана в работах [Вознесенский и др., 2005; Кушнарева, 2008].

После сборки и установки образца в камеру трехосного сжатия, подсоединения всех датчиков деформации (осевой и деформации сдвига) и ввода начальных показаний проводят стадию предварительной консолидации грунта при заданном соотношении напряжений. Эта модификация резонансной колонки позволяет проводить как изотропную, так и анизотропную консолидации. Контроль за изменением объема и высоты образца ведется оператором с монитора по текущим показаниям соответствующих датчиков. Пересчет параметров относительно начальных размеров образца выполняется вручную, поскольку такая возможность не предусмотрена в программном обеспечении резонансной колонки GCTS.

После завершения предварительной консолидации образец испытывается в режиме крутильных колебаний в определенном диапазоне частоты. Амплитуда динамических напряжений задается величиной момента вращения, прикладываемого к верхнему (свободному) торцу образца. Для каждого опыта момент вращения подбирается исходя из индивидуальных особенностей динамической реакции и жесткости испытываемого образца. По получаемой при этом амплитудно-частотной зависимости (резонансной кривой) определяется резонансная частота и рассчитывается динамический модуль сдвига (G) [Padilla, 2004]. После достижения резонанса образец оставляют в состоянии свободного колебания. По уменьшению амплитуды свободных колебаний во времени определяют коэффициент поглощения (D), который оценивается в % от критического затухания. В каждом последующем опыте прикладываемый крутящий момент увеличивают, поэтому постепенно происходит уменьшение резонансной частоты и модуля сдвига. Коэффициент поглощения при этом увеличивается.

Все динамические характеристики рассчитываются автоматически. На выходе получаем значения сдвиговой деформации (γ), модуля сдвига (G) и коэффициента поглощения (D) для каждого уровня крутильных колебаний. Для дальнейшего анализа строится зависимость динамического модуля сдвига и коэффициента поглощения от уровня возникающих деформаций сдвига.

2. **Методика проведения испытаний грунтов в условиях крутильного сдвига на установке TSH-100.** Для оценки динамического модуля сдвига и коэффициента поглощения при деформациях больших, чем достигаются при испытаниях в режиме резонансной

колонки, проведено динамическое нагружение грунтов в режиме крутильного сдвига. При этом уровень сдвиговых деформаций определяется реальными возможностями аппаратуры и для большинства исследованных песчаных и глинистых грунтов (около 60 образцов) составил менее 1%. Эксперименты проводили на тех же образцах после завершения испытаний на резонансной колонке при условии сохранения ненарушенного сложения грунтов. Поскольку программное обеспечение GCTS (программная оболочка SATS) позволяет переходить от одного вида испытаний к другому, то эксперименты проводили без перестановки образца. После испытаний на резонансной колонке образцы уже находятся в консолидированном состоянии при заданных величинах напряжения. Частота приложения циклической нагрузки составляла 0,5 Гц. Амплитуда касательных напряжений увеличивалась ступенчато каждые два цикла (для повышения надежности расчета динамического модуля сдвига) от 12 до 60 кПа. Крутильный сдвиг осуществляли при максимально возможных на данном оборудовании усилиях. Максимальное значение деформации сдвига принималось равным ее амплитуде.

В результате получены те же динамические характеристики грунтов. Однако в условиях крутильного сдвига оценка поглощения проводится для вынужденных колебаний при заданной частоте, а при испытаниях на резонансной колонке коэффициент поглощения определяется в режиме свободных затухающих колебаний.

3. **Динамические испытания в режиме трехосного сжатия.** Эксперименты проводили на автоматизированной установке динамического трехосного сжатия производства «Geotechnical Instruments» (Канада) по схеме недренированных испытаний водонасыщенных образцов с контролем напряжений. Методики подготовки образца, проведения динамического трехосного сжатия и анализа полученных результатов изложены в работе [Кушнарева, 2008].

Помимо наиболее часто используемых показателей динамической устойчивости грунтов (общее число циклов воздействия до достижения заданного уровня осевой деформации, значения накопленных осевых деформаций и относительного порового давления за одинаковое число циклов нагружения) использована величина удельной рассеянной энергии (ΔW) — чем больше эта величина, тем более динамически устойчив грунт. Методика расчета удельной рассеянной энергии предложена Е.А. Вознесенским [Вознесенский, 2000].

Таким образом, сопоставление значений коэффициента поглощения, рассчитанных при испытании разными методами, позволяет проследить его изменение в весьма широком диапазоне генерируемых в грунте деформаций — от 10^{-4} – $10^{-3}\%$ до нескольких процентов.

Характеристика исследованных грунтов. В экспериментах использован широкий спектр связных и

несвязных грунтов, а также мергели. Все глинистые грунты исследованы в ненарушенном сложении; кроме того, из некоторых приготовлены образцы нарушенного сложения, испытанные в тех же условиях, что позволило оценить влияние типа структуры на жесткость и поглощение глинистых грунтов. С этой целью изучены следующие группы глинистых грунтов: 1) нормально уплотненные с коагуляционными структурами (преобладание ближних коагуляционных контактов) — морские глины неогенового возраста из скважины на шельфе о. Сахалин в интервале глубины 17–83 м; 2) слабопереуплотненные до нормально уплотненных аллювиальные, озерно-аллювиальные, делювиальные и ледниковые отложения среднего—верхнего неоплейстоцена и голоцена — глинистые грунты с коагуляционными структурами, отобранные из шурфов и скважин в Санкт-Петербурге, Среднем Приобье и Томской области; 3) слабопереуплотненные озерно-аллювиальные отложения среднего неоплейстоцена со смешанными структурами с преобладанием коагуляционных и подчиненной ролью переходных контактов между частицами из разреза водораздельной равнины в Среднем Приобье и тайгинской свиты в Томской области; 4) переуплотненные морские и озерно-морские отложения олигоцена—среднего неоплейстоцена с переходными и смешанными структурами из разрезов кочковской, лагернотомской и новомихайловской свит в Томской области; 5) сильнопереуплотненные глинистые грунты с преимущественно переходными и смешанными — коагуляционно-конденсационными — структурами из разреза котлинского горизонта нижнего венда (Санкт-Петербург). Эта часть выборки характеризуется широким диапазоном изменения состава и свойств: влажность грунтов варьировала от 14 до 36%, плотность — от 1,78 до 2,18 г/см³, коэффициент пористости — от 0,38 до 1,00, число пластичности — от 5 (супеси) до 29 (глины тяжелые), консистенция грунтов — от твердой до текучей. Диапазон глубины отбора образцов 1,5–97,5 м.

Песчаные грунты испытывали на искусственно сформированных образцах в условиях полного водонасыщения. Пески были представлены всеми гранулометрическими разностями от гравелистых до пылеватых, коэффициент пористости образцов в испытаниях варьировал в диапазоне 0,53–0,84, а влажность водонасыщенных образцов составляла от 12 до 29%.

Верхнемеловые мергели (г. Новороссийск) испытывали на образцах ненарушенного сложения, вырезанных из наименее трещиноватых частей монолитов. Соотношение карбонатной и терригенной составляющих по выборочному анализу шлифов варьирует у разных образцов в пределах 15–70 и 20–75%, соответственно.

Описанная выборка грунтов должна была позволить, с одной стороны, проследить некоторые общие для всех грунтов закономерности проявления эффекта

поглощения волн напряжения, а с другой — выявить его наиболее существенные различия в грунтах с разным типом структурных связей и, таким образом, расширить и уточнить существующие представления о природе явления.

Установленные закономерности и их интерпретация. При исследовании явления поглощения волн напряжений в грунтах оценивались и общие закономерности изменения их динамической деформируемости (жесткости), характеризовавшиеся величиной динамического модуля сдвига (G , МПа), что позволяет глубже понять природу поглощения, связанную с упругостью среды и преобразованиями энергии волны при возникновении и развитии пластических деформаций. В качестве важнейших факторов, влияющих на поглощение и жесткость грунтов, мы рассматривали уровень сдвигового деформирования грунтов, их дисперсность, а также величину и продолжительность действия сжимающих напряжений.

Влияние уровня деформирования. Опубликованные работы других исследователей, а также полученные нами экспериментальные данные показывают, что определяющее влияние на величину коэффициента поглощения оказывает уровень сдвиговых деформаций, возникающих при распространении волны напряжений: в области деформаций сдвига примерно до 0,1% коэффициент поглощения и динамический модуль сдвига всех грунтов не являются монотонными функциями амплитуды возникающих деформаций. В целом эти зависимости имеют вид, представленный на рис. 1. На диаграммах зависимости G и D от деформации сдвига для всех грунтов, как правило, можно выделить три характерных участка: 1) диапазон деформаций $\sim 10^{-4}$ – 10^{-3} %, отличающийся замедленным снижением модуля сдвига и постепенным увеличением коэффициента поглощения; 2) диапазон деформаций $\sim 10^{-3}$ – 10^{-2} %, характеризующийся ускоренным снижением G и ростом D ; 3) участок при больших деформациях, на котором темп изменения этих показателей снова замедляется. Граничные

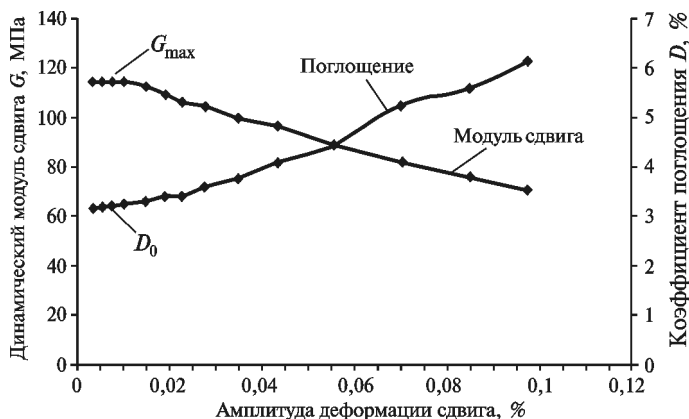


Рис. 1. Изменение значений коэффициента поглощения и динамического модуля сдвига глины V_{1kt} (Санкт-Петербург) в функции амплитуды деформации сдвига ($\sigma' = 487$ кПа, $\rho = 2,11$ г/см³, $We = 18\%$, $e = 0,536$, $S_r = 0,94$)

значения деформаций, разделяющие эти диапазоны, разумеется, различаются для грунтов с разным типом структурных связей, что согласуется с представлениями современного грунтоведения.

Анализ таких зависимостей показывает, что в области малых относительных деформаций (приблизительно до 10^{-4}) динамический модуль сдвига (упругость) и поглощение грунтов можно считать постоянными и равными G_{\max} и D_0 , соответственно (рис. 1). Лишь после преодоления этого порогового уровня деформаций в большинстве случаев фиксируются монотонное увеличение поглощения и деградация упругости, что означает изменение механизма поглощения или появление какого-то дополнительного источника потерь энергии воздействия. Таким дополнительным механизмом повышения поглощения служит, по нашему мнению, появление необратимых пластических деформаций грунта. Таким образом, именно на этом уровне деформаций поглощение, обусловленное ранее неидеальной упругостью и вязкими потерями (внутренним трением), повышается за счет разрыва части структурных связей грунта и увеличения его внутренней энергии, что отражается и в снижении жесткости системы.

Дальнейшая эскалация поглощения при деформациях более 10^{-3} требует уже других методов исследования, ее изучали в условиях крутильного сдвига, а затем динамического трехосного сжатия одних и тех же образцов. В условиях крутильного сдвига получены резкие изменения динамических характеристик всех исследованных грунтов, что выражается в снижении в несколько раз модуля сдвига и повышении поглощения более чем на порядок. Это обусловлено не только достигаемым уровнем деформации, но и различиями в самом принципе определения этих характеристик в условиях резонансной колонки и крутильного сдвига. Скорость приложения нагрузки при крутильном сдвиге существенно ниже, что вызывает снижение жесткости грунтов и усиление поглощения за счет вязких эффектов. На величину поглощения помимо собственно релаксационных эффектов влияет и его зависимость от частоты, которая различается на порядки для вынужденных колебаний при крутильном сдвиге и свободных затухающих колебаний. Все это определяет низкие значения модуля сдвига и высокие значения коэффициента поглощения в режиме крутильного сдвига всех грунтов.

Результаты совместного анализа изменения поглощения для песчаных и глинистых грунтов показывают, что в диапазоне сдвиговых деформаций 0,1–0,2% коэффициент поглощения песчаных грунтов повышается до 12–31%, а глинистых — до 18–32%. Дальнейший рост деформаций (по отдельным результатам до 0,7–1%) приводит к увеличению поглощения до 45–55% и у песчаных, и у глинистых грунтов (рис. 2).

Полученные данные свидетельствуют о наличии еще одного качественного скачка — замедление темпа

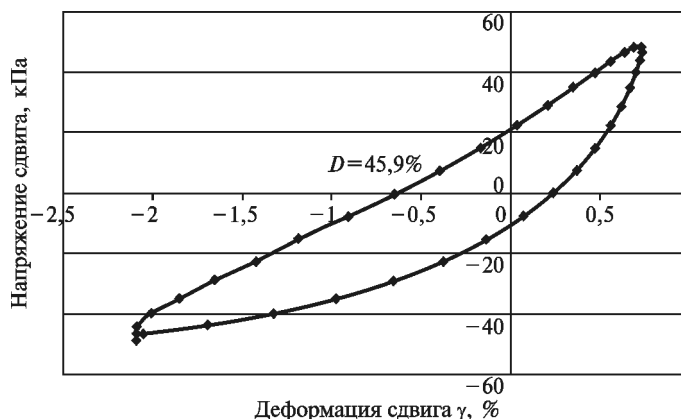


Рис. 2. Поглощение при больших деформациях по площади петли гистерезиса при крутильном сдвиге в суглинке лужской морены gПлз (Санкт-Петербург)

увеличения поглощения и в песчаных, и в глинистых грунтах на уровне деформаций сдвига, составляющих 0,2% (рис. 3). Это весьма важный момент, указывающий опять-таки на изменение механизма потерь энергии волн напряжений. По нашему мнению, снижение темпа увеличения коэффициента поглощения при деформациях сдвига выше 0,2% обусловлено двумя причинами. Во-первых, резким снижением доли упругих деформаций по мере деградации структурных связей, на это указывает и быстрое многократное

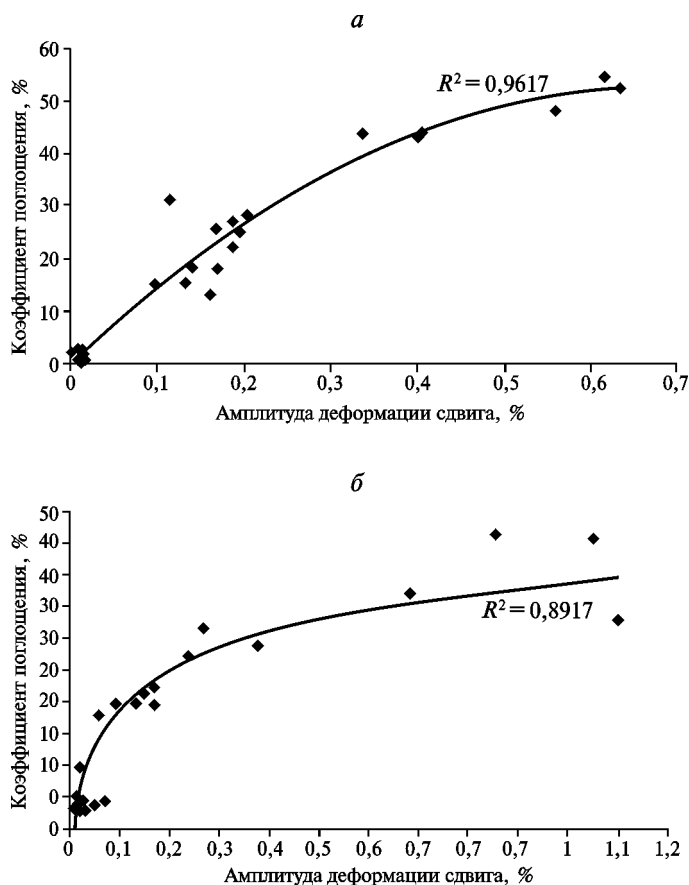


Рис. 3. Изменение поглощения песчаных (а) и глинистых (б) грунтов в диапазоне средних деформаций сдвига по данным испытаний на резонансной колонке и динамического крутильного сдвига

снижение динамического модуля сдвига грунтов в условиях крутильного сдвига. Таким образом, доля поглощения, связанная с неидеальной упругостью грунта и теплопотерями, снижается. А во-вторых, в отмеченной выше частотной зависимости коэффициента поглощения. В целом эффект снижения темпа роста поглощения с повышением деформации более выражен у глинистых грунтов. При дальнейшем увеличении амплитуды деформаций до нескольких процентов уже в условиях динамического трехосного сжатия получено, что при уровне сдвиговых деформаций в несколько процентов величина коэффициента поглощения составляет 50–80%, по мере дальнейшего накопления пластических деформаций постепенно приближаясь к уровню критического затухания.

Влияние дисперсности грунтов. Установлены существенно более высокие уровни поглощения для глинистых грунтов по сравнению с песчаными при прочих равных условиях: во всем диапазоне исследованных нами сжимающих нагрузок (до 1,2–1,3 МПа) и при уровне деформаций сдвига не более 0,1% поглощение песчаных грунтов редко превышало 3–4%, а при высоких сжимающих напряжениях снижалось даже меньше 1%. Поглощение же глинистых грунтов во многих случаях достигало 7–8% и даже более. Отмеченный эффект обусловлен прежде всего меньшей долей вязких потерь в суммарном поглощении при отсутствии пленок жидкости на контактах между частицами. Уменьшение толщины водной пленки и соответствующее снижение вязких потерь лежит и в основе снижения поглощения с ростом сжимающих напряжений.

Поглощение в песчаных грунтах возрастает с увеличением их дисперсности, что обусловлено главным образом повышением в этом же ряду их пористости и снижением кулоновского трения в системе. Особенно заметны изменения поглощения при переходе к пескам пылеватым и с высоким содержанием пылевато-глинистых частиц, поскольку с появлением молекулярных структурных связей возрастают вязкие потери в пленках связанной влаги и воды переходного типа на контактах между частицами.

Влияние сжимающих напряжений. С повышением величины сжимающих напряжений поглощение песчаных грунтов снижается, причем в наибольшей степени этот эффект выражен у более дисперсных разностей, особенно у песков пылеватых. С увеличением размера зерен влияние сжимающих напряжений на поглощение волн напряжений, а значит и глубины залегания, становится все менее значимым. Этот эффект обусловлен повышением трения и снижением деформируемости песков с ростом суммарной площади взаимодействия частиц по мере уменьшения пористости. Это подтверждается и увеличением динамического модуля с повышением сжимающих напряжений.

С ростом сжимающих напряжений у глинистых грунтов, так же как у песчаных грунтов, просматрива-

ется тенденция к увеличению динамического модуля сдвига и снижению их поглощения. При этом изменения поглощения и модуля сдвига глинистых грунтов в разрезе обычно не закономерные. Они также явным образом могут быть не связаны с вариациями плотности и влажности грунтов, если диапазоны изменения этих показателей невелики. Все это говорит о том, что определяющее влияние на жесткость и поглощение грунтов оказывает тип структурных связей. Показано, в частности, что пасты, приготовленные из глинистых грунтов со смешанными структурами, при тех же уровнях сжимающих напряжений характеризуются в несколько раз более высокими значениями коэффициента поглощения (до 10–15%), чем исходные грунты ненарушенного сложения. Поглощение глинистых грунтов в зависимости от величины нормальных напряжений характеризуется меньшей изменчивостью по сравнению с модулем сдвига. При этом далеко не всегда грунты с наибольшими значениями модуля сдвига характеризуются и наименьшим поглощением, которое, по-видимому, в большей степени зависит от других факторов, например от минерального состава или присутствия органического вещества.

Влияние длительности уплотнения. Важный методический аспект экспериментального определения поглощения — влияние длительности предшествующего уплотнения: насколько существенно могут изменяться демпфирующие свойства грунтов основания по мере развития процесса вторичной консолидации. Для этого проведены специальные исследования песчаных и глинистых грунтов, в которых на одних и тех же образцах при малых деформациях (до ~0,10%) проведено несколько серий испытаний методом резонансной колонки: сначала по окончании первичной консолидации, а затем при той же нагрузке через интервалы времени, примерно в 2, 4 и 8 раз превышающие время, необходимое для первичной консолидации.

Полученные результаты показывают, что с увеличением времени консолидации модуль сдвига у большинства исследованных связных грунтов закономерно возрастает, а поглощение снижается (рис. 4). При этом эффект снижения поглощения с увеличением длительности консолидации может достигать 25% при одном и том же уровне сдвиговых деформаций. У песков же, даже пылеватых, эффект длительности предварительной консолидации практически отсутствует (рис. 5).

Нами впервые исследованы диссипативные характеристики мергелей — сведения о динамических свойствах этих полускальных грунтов в научной литературе пока отсутствуют. Получено, что в целом для выборки из 30 образцов наиболее существенные изменения модуля сдвига и поглощения в мергелях в широком диапазоне сжимающих напряжений зафиксированы на уровне деформации сдвига ~0,01%. При этом величина коэффициента поглощения мергелей при уровне сдвиговых деформаций не выше 0,01% у

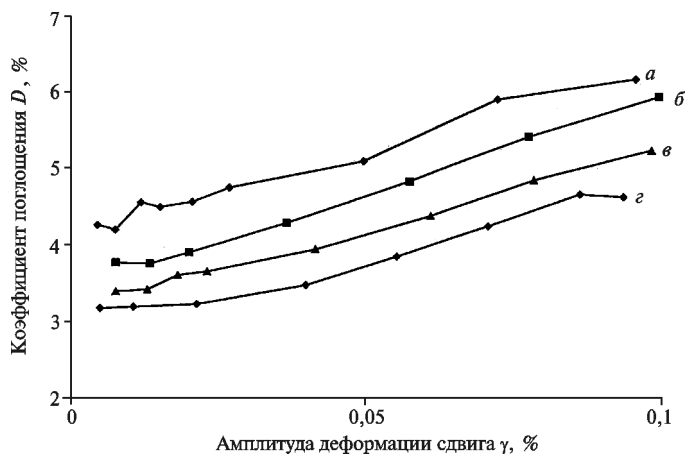


Рис. 4. Постепенное снижение коэффициента поглощения суглинков с увеличением продолжительности консолидации: а — 7200 с; б — 14 400 с; в — 28 800 с; г — 56 400 с

абсолютного большинства (80%) образцов находится в диапазоне 1–3%. Лишь у 20% образцов он оказался существенно выше 3% (до 5,4%). При немного более высоких деформациях сдвига поглощение заметно возрастает, достигая в отдельных горизонтах 6, 7 и даже 10%. При этом плотность (варьирует от 2,48 до 2,62 г/см³) не оказывает определяющего влияния ни на поглощение грунтов, ни на их модуль сдвига. Выявленная зависимость динамических характеристик мергелей от глубины залегания и, следовательно, от величины сжимающих напряжений отсутствует, что обусловлено значительной ролью жестких структурных связей в этих полускальных грунтах. Учитывая описанный характер вариаций динамических характеристик мергелей, а также отсутствие явной зависимости их величины от плотности, а значит и пористости образцов, можно констатировать, что динамический модуль сдвига и коэффициент поглощения этих пород контролируются еще каким-то весьма важным фактором. Таким фактором, наиболее вероятно, является глинистость мергелей, так, выборочная оценка соотношения содержания глинистого и карбонатного материала показала, что наиболее высокие значения коэффициента поглощения, как правило, характерны для горизонтов с повышенным содержанием глинистого вещества.

Выводы. 1. Определяющее влияние на величину коэффициента поглощения оказывает уровень возникающих при распространении волны напряжений сдвиговых деформаций. При этом можно выделить два пороговых уровня деформации, при достижении которых происходят качественные изменения поглощения:

— в области малых относительных деформаций (примерно до 10^{-4}) поглощение грунтов можно считать постоянным и обусловленным неидеальной упругостью и вязкими потерями; после преодоления этого порога деформаций поглощение монотонно увеличивается в результате возникновения начальных пластических деформаций грунта;

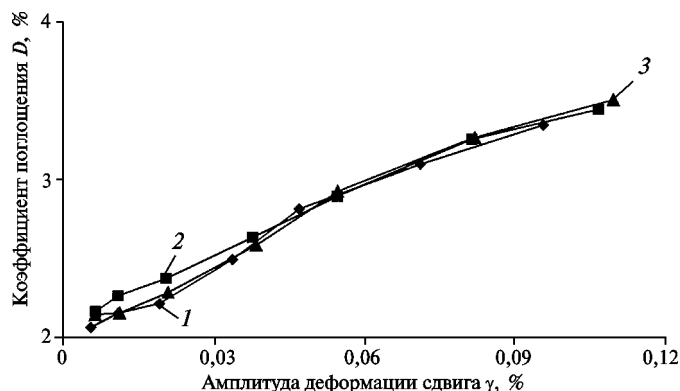


Рис. 5. Изменение значений коэффициента поглощения песка пылеватого при нормальной нагрузке 350 кПа и разной длительности консолидации: 1 — 3600 с; 2 — 7200 с; 3 — 18 000 с

— в области сдвиговых деформаций средней величины наблюдается снижение темпа увеличения коэффициента поглощения при относительных деформациях сдвига выше 0,002, что обусловлено резким снижением доли поглощения на неидеальную упругость грунта и теплопотери по мере деградации структурных связей, а также частотной зависимостью коэффициента поглощения, поскольку при переходе к другому методу определения поглощения существенно снижается частота колебаний образца.

2. Установлены существенно более высокие уровни поглощения для влажных и водонасыщенных глинистых грунтов по сравнению с песчаными при одном уровне сжимающих напряжений, что обусловлено меньшей долей вязких потерь в суммарном поглощении при отсутствии пленок жидкости на контактах между частицами.

3. Поглощение водонасыщенных песчаных грунтов возрастает с увеличением их дисперсности, что особенно заметно при переходе к пескам пылеватым. Это связано с повышением коэффициента пористости и снижением кулоновского трения в системе, а также с увеличением доли вязких потерь на контактах между частицами при повышении роли молекулярных структурных связей.

4. Коэффициент поглощения у всех исследованных грунтов снижается с ростом сжимающих напряжений, в основе чего лежат снижение вязких потерь по мере уменьшения толщины водной пленки на контактах частиц и повышение кулоновского трения в системе. С увеличением продолжительности консолидации поглощение влажных и водонасыщенных связных грунтов нарушенного и природного сложения закономерно снижается, этот эффект может достигать 25% при одном и том же уровне сдвиговых деформаций. У песков же, даже пылеватых, эффект длительности предварительной консолидации практически отсутствует. Это положение имеет существенное методическое значение для экспериментального исследования поглощения грунтов.

5. Величина коэффициента поглощения у мергелей в воздушно-сухом состоянии при уровне сдвиго-

вых деформаций не выше 0,01% обычно не превышает 1–3%, лишь иногда повышаясь до 5–6%. При более высоких деформациях сдвига поглощение может достигать 6–10%. При этом содержание глинистого вещества больше влияет на поглощение мергелей, чем их плотность.

б. Поглощение энергии волн напряжений как один из компонентов их общего затухания имеет сложную природу: при малых относительных деформациях

(менее $(1\pm 3)\cdot 10^{-4}$) оно обусловлено преимущественно нелинейной упругостью и внутренней вязкостью, главным образом, по-видимому, вязкостью пленок адсорбированной воды и влаги переходного типа, тогда как при больших относительных деформациях ($> 2\cdot 10^{-3}$) поглощение определяется в основном величиной рассеянной энергии, израсходованной на пластические деформации, разрушение структурных связей грунта и относительное смещение его частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вознесенский Е.А.* Динамическая неустойчивость грунтов: Автореф. докт. дисс. М., МГУ, 2000. 54 с.
- Вознесенский Е.А., Коваленко В.Г., Кушнарёва Е.С., Фуникова В.В.* Разжижение грунтов при циклических нагрузках. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 134 с.
- Голицын Б.Б.* О дисперсии и затухании сейсмических поверхностных волн // Изв. Имп. АН. 1912. Вып. 6, № 2. С. 219–236.
- Ишихара К.* Поведение грунтов при землетрясениях. СПб.: НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2006. 383 с.
- Карус Е.В.* Поглощение упругих колебаний в горных породах при стационарном возбуждении // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1958. № 4. С. 438–448.
- Коган С.Я.* Краткий обзор теорий поглощения сейсмических волн // Физика Земли. 1966. № 11. С. 1–28.
- Кондратьев О.К.* Сейсмические волны в поглощающих средах. М.: Недра, 1986. 176 с.
- Красников Н.Д.* Динамические свойства грунтов и методы их определения. Л.: Стройиздат, 1970. 239 с.
- Кушнарёва Е.С.* Устойчивость водонасыщенных песков при динамическом воздействии: Автореф. канд. дисс. М., МГУ, 2008. 18 с.
- Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Механика сплошных сред. Изд. 2. М.: Гостехиздат, 1954. 796 с.
- Пузырев Н.Н.* Объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию. Новосибирск: Изд-во СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1997. 301 с.
- Ризниченко Ю.В.* О расхождении и поглощении сейсмических волн // Тр. Геофиз. ин-та АН СССР. 1956. № 35 (162). С. 9–41.
- Biot M.A.* Theory of stress-strain relations in anisotropic viscoelasticity and relaxation phenomena // J. of Applied Physics. 1954. Vol. 25, N 11. P. 1385–1391.
- Hardin B.O., Drnevich V.P.* Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves // J. of the Soils Mechanics and Foundation Engineering Division. ASCE. 1972. Vol. 98, N SM7. P. 667–692.
- Jeffreys H.* The viscosity of the Earth. III // Mon. Not. Roy. Astr. Soc. 1917. Vol. 77, N 5. P. 449–456.
- Kim T.C., Novak M.* Dynamic properties of some cohesive soils of Ontario // Can. Geotechnical J. 1981. Vol. 18. P. 371–389.
- Lanzo G., Pagliaroli A., Tommasi P., Chiocci F.L.* Simple shear testing of sensitive very soft offshore clay for wide strain range // Can. Geotechnical J. 2009. Vol. 46, N 11. P. 1277–1288.
- Padilla J.M.* GCTS Resonant Column Device. 2004. 25 p.
- Sagaseta C., Cuellar V., Pastor M.* Cyclic loading // Proceed. of the tenth Europ. Conf. on soil mechanics and foundation engineering. 1991. Vol. 3. P. 981–990.
- Vucetic M., Dobry R.* Effect of soil plasticity on cyclic response // J. of Geotechnical Engineering. 1991. Vol. 117. P. 89–107.

Поступила в редакцию
03.03.2011