

Влияние резонансных и нелинейных свойств грунтов на сейсмическую опасность строительных площадок

© А. В. Кендзера, Ю. В. Семенова, 2016

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 25 января 2016 г.

Представлено членом редколлегии Д. Н. Гринем

Розглянуто питання необхідності врахування резонансних і нелінійних ефектів у грунтах під час сейсмічного мікрорайонування будівельних та експлуатаційних майданчиків. Резонансні і нелінійні явища тісно пов'язані один з одним і залежать від будови середовища під майданчиком та інтенсивності сейсмічних впливів. Наведено приклади того, що вказані явища є частою причиною руйнування і пошкодження сейсмостійких споруд під час землетрусів. Оцінено методи, використання яких дає змогу на сучасному рівні обчислювати частотні характеристики моделей ґрунту з урахуванням його нелінійних і резонансних властивостей. Наведено результати порівняльного аналізу теоретичних розрахунків частотних характеристик для моделей ґрунтів з різною потужністю шару і різними сейсмічними властивостями. Показано, що прояв нелінійних властивостей ґрунту залежить від його фізичних властивостей і напруженого стану. Виконано порівняння частотних характеристик ґрунтових комплексів, розрахованих з огляду на реологічні властивості, для різних будівельних майданчиків в Одеській області та в Києві. Досліджено вплив різних чинників на спектральний склад і величину коливань верхньої частини розрізу геологічного середовища під будівельним майданчиком. Сформульовано умови виникнення в ній небезпечних резонансних явищ.

Ключові слова: сейсмічне мікрорайонування, нелінійна поведінка ґрунтів, резонансні властивості ґрунтів, частотні характеристики ґрунтів, еквівалентна лінійна модель.

Вступление. Разрушительные последствия землетрясений определяются положением источника колебаний относительно строительной (эксплуатационной) площадки, силой толчка, диаграммой направленности, спектром излученных волн, а также характером сотрясений (реакцией) приповерхностных грунтов, который часто бывает решающим фактором сейсмической опасности. Риск разрушения объекта зависит также от качества сейсмостойкого проектирования и строительства. Обеспечение необходимого качества возможно только при условии правильного прогнозирования количественных параметров сейсмической опасности площадки, осуществляемой с помощью комплекса работ по ее сейсмическому микрорайонированию [Кендзера, 2015; Kendzera, 2015].

Применяемые методы сейсмического микрорайонирования основываются на опыте изучения макросейсмических проявлений при сильных землетрясениях и на исследовании искажений сейсмических волновых полей от слабых местных и удаленных землетрясений в зависимости от грунтовых условий, релье-

фа, строения приповерхностной части земной коры. Таким образом, сильные сейсмические движения грунта изучаются на основе описываемых макросейсмических показателей, которые трудно соотнести с физическими параметрами сейсмических движений, получаемых по инструментальным данным.

Эмпирические формулы, рекомендуемые действующими нормативными документами [Инженерные..., 1988; Будівництво..., 2014], обладают большой общностью и не учитывают изменчивость поведения грунтов при сейсмических воздействиях различной интенсивности.

В последнее время для сейсмического микрорайонирования все шире применяются инструментальные способы, с помощью которых изучение особенностей слабых движений грунта используют для прогнозирования эффекта сильных землетрясений. В то же время известно, что при сильных сейсмических движениях грунта значительную роль играют нелинейные явления, которые особенно сильно проявляются в рыхлых осадочных грунтах — супесях, суглинках, водонасыщенных глинах.

Более того, в некоторых случаях они имеют решающее значение и требуют детального исследования и создания более совершенных, чем существующие, методов расчета приращенной сейсмической интенсивности (балльности) за счет местных грунтовых условий. К сожалению, до настоящего времени проблеме исследования и учета нелинейных явлений при расчете сейсмических колебаний уделялось мало внимания.

В практике сейсмического микрорайонирования недостаточно исследованными в настоящее время остаются резонансные явления. В строительные нормативы вошли лишь рекомендации по расчету преобладающих периодов колебаний грунтовой толщи. Использование микросейсм для учета резонансов теоретически оправдано, но на практике сопряжено с плохо учитываемыми погрешностями, возникающими из-за влияния природных и техногенных помех.

Факторы, влияющие на спектральный состав и величину колебаний на кровле фундамента. Каждое землетрясение характеризуется определенным спектральным составом, излучаемым из его очага. При этом, чем больше очаговая зона землетрясения, тем более низкочастотные колебания грунта она генерирует [Заалишвили, 2009]. Эта зависимость проявляется и при моделировании простых динамических воздействий импульсного и вибрационного типов (например, при ударах молотов с разными массами и т. п.). Известно также, что период колебаний грунтов коррелируется с длительностью процессов в очаге землетрясения, которая всегда больше при активизации большего объема, а следовательно, и массы геологической среды. Установлено также, что период колебаний грунтов пропорционален магнитуде землетрясения, являющейся показателем, пропорциональным энергии, выделенной в сейсмические волны. Чем сильнее землетрясение, тем большими периодами и более широким частотным диапазоном характеризуется спектр сейсмических воздействий. Отмеченные факторы формируют спектральный состав колебаний на кровле фундамента под строительными (эксплуатационными) участками зданий и сооружений.

Сейсмический эффект землетрясения определяется в основном тремя параметрами: уровнем амплитуд, спектральным составом и продолжительностью колебаний. Последний фактор (при возникновении резонанса) может иметь решающее значение для разрушения

сооружений, в то время как кратковременная нагрузка даже с весьма высоким пиковым значением ускорения может оказаться неопасной. Показательной в этом отношении является запись, полученная в Паркфилде при Калифорнийском землетрясении 27 июня 1966 г.: максимальные ускорения на поверхности достигали $0,5g$ [Вознесенский, 1999], что соответствует 10-балльному толчку, но из-за краткости воздействия существенных повреждений зданий не наблюдалось. Сравнительно длительное (несколько десятков секунд) малоамплитудное воздействие может привести к серьезным разрушениям. Яркий пример этого — полное разрушение многоэтажных зданий в центре Мехико при землетрясении 28 июля 1957 г. с максимальными ускорениями в пределах $0,05—0,1g$ [Вознесенский, 1999].

Воздействие на спектральный состав и величину сейсмических проявлений на свободной поверхности строительных площадок оказывают фильтрующие свойства осадочных пород (грунтовой толщи). Большое влияние параметров близповерхностного строения грунта связано с отражением волн от свободной поверхности и превращением потенциальной энергии сейсмических колебаний в кинетическую энергию. В связи с этим, например, при нормальном падении объемных волн амплитуда колебаний на свободной поверхности грунта увеличивается в 4 раза по сравнению с амплитудой внутри среды.

Грунтовая толща, состоящая из одного или нескольких слоев, обладает избирательной частотной характеристикой, выделяя и усиливая (или ослабляя) колебания в определенных полосах частот. Причиной потенциально опасного избирательного усиления сейсмических колебаний на площадке является интерференция сейсмических волн, многократно отраженных в слоях, и резонансные усиления колебаний при совпадении периодов падающих сейсмических волн и собственных периодов, соответствующих максимумам частотных характеристик слоистой грунтовой толщи. В результате амплитудно-частотный спектр сейсмических колебаний на свободной поверхности грунтовой толщи зависит от спектрального состава и угла подхода волны, геометрии и литологического состава грунтовой толщи, а также ее физико-механических свойств.

Резонансные явления. Задача оценки сейсмической опасности, сейсмического риска и сейсмической защиты усложняется плохо прогнозируемыми эффектами резонансного уси-

ления сейсмических колебаний рыхлыми приповерхностными грунтами. В зависимости от их типа и мощности пластов колебания одних частотных интервалов могут избирательно усиливаться, а других — не изменяться либо практически полностью поглощаться. Это явление связано с возбуждением волнами различных типов собственных колебаний грунтовых пластов вблизи свободной поверхности.

При совпадении максимальной частоты колебаний в сейсмическом воздействии (частот колебаний грунтов) с собственными частотами колебаний зданий и сооружений возникают резонансные явления, которые являются одной из причин повреждений и разрушений жилых зданий и промышленных сооружений. При возникновении резонанса резко возрастают напряжения в конструкциях сооружений и вероятность их разрушения повышается. Особенно опасно резонансное усиление колебаний зданий и сооружений, в которых центр тяжести значительно удален от точки опоры, что характерно для высотных зданий, мостовых опор, труб и др. Как правило, объекты такого типа характеризуются низкими значениями собственных затуханий.

При землетрясении Лома-Приета в Калифорнии (1989) с $M=7,1$ больше всего пострадала часть Сан-Франциско, расположенная на молодых морских глинистых отложениях. Сейсмограммы землетрясения показали, что по сравнению с другими участками амплитуды сейсмических колебаний на этих грунтах были увеличены в 6—10 раз на частотах около 1 Гц и в 2—3 раза на частотах 3—5 Гц [Вознесенский, 1999]. Отметим, что собственные частоты многих разрушенных 3- и 4-этажных домов как раз составляли 2,5—3 Гц.

Драматичен также пример мексиканского землетрясения 1985 г. с $M=8,1$, при котором в отдельных частях Мехико, расположенном в 400 км от эпицентра, наблюдались колебания с максимальными ускорениями 175 см/с^2 , что превышало максимальные ускорения, зарегистрированные

стрированные в очаговой зоне. Резонансное усиление сейсмических колебаний наблюдалось только на периодах около 2 с, что привело к избирательному разрушению 15—25-этажных зданий (с близкими собственными периодами колебаний) и к гибели 10 тыс. человек.

В связи с возможностью возникновения резонансных явлений для проектирования сейсмостойких зданий необходимы не только сведения о силе и месте возможных землетрясений, но и надежные данные о собственных периодах колебаний проектируемых объектов и резонансных свойствах грунтов в их основании.

В работе [Заалишвили, 2009] рассмотрено влияние грунтовой толщи на особенности формирования спектра для модели разреза грунтовой толщи под строительной площадкой в Ленинакане. Расчеты проводились с использованием метода отраженных волн для модели, приведенной в табл. 1.

Анализ результатов расчета показал увеличение максимальных амплитуд колебаний на свободной поверхности в 1,7 раз. При этом максимум расчетной акселерограммы соответствовал частоте колебаний 2 Гц или периоду $T=0,5 \text{ с}$.

Было доказано, что основной причиной увеличения сейсмического эффекта в Ленинакане при известном армянском землетрясении 1988 г. были не только плохое качество стройматериалов и строительства, но и резонансные явления — совпадение периодов колебаний зданий с периодами колебаний грунтовой толщи [Заалишвили, 2009].

Из-за резонансных эффектов при мощных удаленных землетрясениях с низкочастотными колебаниями более уязвимыми будут здания с низкими собственными частотами, а при местных землетрясениях — с высокочастотными. Собственная частота зданий F_n зависит от массы, высоты и гибкости здания. Высотное здание при землетрясении не уязвимо для коротких волн (высокочастотных колебаний), в

Таблица 1. Модель строения геологической среды под строительной площадкой в Ленинакане

Литологический состав	Мощность слоя, м	Плотность, кг/м^3	Скорость поперечной волны, м/с
Насыпные грунты	10	2000	1500
Осадочные отложения	300	1600	500
Подстилающие коренные породы	300— ∞	2400	2000

то время как оно может быть разрушено длительными низкочастотными воздействиями. Собственную частоту зданий F_n можно приблизительно оценить по формуле $F_n = 10/n$, где n — количество этажей [Kramer, 1996].

Наиболее заметные сейсмические проявления на территории Украины связаны с крупными землетрясениями в очаговой зоне Вранча в Восточных Карпатах. На территории Украины землетрясения из этой зоны создают волновой пакет с широким частотным диапазоном и длительностью в десятки минут, благодаря чему они способны ввести в резонансные колебания высотные дома и большие сооружения.

Нелинейные свойства грунтов. Традиционная сейсмология основана на предположении линейной зависимости напряжений и деформаций во временном диапазоне от 0,01 с до 10000 лет. Об отклонениях от этой зависимости сейсмологи знают давно [Алешин, 2010]. Предполагалось, что нелинейные процессы происходят только в очаговой зоне землетрясений, а начиная с некоторой референц-сферы процессы распространения сейсмических волн развиваются в соответствии с линейными представлениями. Из квазилинейности сейсмических процессов в дальней от очага зоне следует принцип суперпозиции и много других простых и полезных для анализа сейсмических полей следствий. В связи со сложностью описания нелинейными процессами часто пренебрегали. Значительный интерес к нелинейным процессам и нелинейным свойствам грунтов проявился лишь сравнительно недавно с внедрением в практику вибрационных методов возбуждения колебаний для изучения геологической среды. Современный сейсмический вибратор позволяет создавать динамические напряжения в грунте порядка 1 кг/см^2 [Алешин, 2010]. Казалось бы, эти напряжения не столь велики, чтобы быть причиной значительных нелинейных искажений сигнала. Но в действительности нелинейные эффекты оказались весьма значительными и разнообразными. На виброграммах вызванных колебаний отчетливо регистрировались кратные частоты, а при взаимодействии двух и больше вибраторов с разными частотами колебаний возникали разностные и суммарные биения и эффекты изменения характеристик колебаний со временем.

Зависимости «напряжение—деформация» в грунтах при сейсмических воздействиях определяют фильтрационные свойства среды и характер преобразования ею входных сейс-

мических сигналов. Нелинейность зависимостей «напряжение—деформация» приводит к искажениям формы колебаний во временной области и спектров наблюдаемых сейсмических волн. В общем случае соотношение между входным и выходным сигналом нелинейной системы можно представить в виде ряда Вольтера [Marmarelis, 2004]:

$$y(t) = k_0 + \int_0^\infty k_1(\tau)x(t-\tau)d\tau + \\ + \int_0^\infty \int_0^\infty k_2(\tau_1, \tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 + \\ + \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty k_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)x(t-\tau_3)d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots,$$

где $x(t)$ — входной сигнал, $y(t)$ — выходной, t — время, $\tau, \tau_1, \tau_2, \tau_3$ — временные задержки, $k_0, k_1(\tau), k_2(\tau_1, \tau_2), k_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3)$ — ядра Вольтера нулевого, первого, второго и третьего порядков. Ядро первого порядка $k_1(\tau)$ описывает линейную часть реакции системы, последующие члены уравнения представляют собой квадратичную, кубическую и другие нелинейные поправки. Таким образом, анализируя входные и выходные сигналы, можно судить о типах нелинейности и количественных характеристиках нелинейной среды.

Установлено, что записи землетрясений различной интенсивности на осадочных породах имеют существенно различающиеся формы [Павленко, 2009]. Частотный состав и интенсивность колебаний на поверхности зависят не только от величины землетрясения в очаге, но и от грунтовых условий пункта наблюдений. При сильных землетрясениях может наблюдаться уплотнение грунта, просадочность, разрыхление и набухание рыхлых грунтов, разжижение водонасыщенных грунтов, остаточные деформации и др. Причем высокая интенсивность колебаний не обязательно приводит к заметным проявлениям нелинейности; нелинейный эффект зависит от состава и мощности осадочных отложений, их обводненности, уровня грунтовых вод, а также от интенсивности и резонансных эффектов, определяемых совпадением частотного состава сейсмических волн и собственных периодов колебания грунтовой толщи.

Рыхлые увлажненные грунты (пески, глины, суглинки, т. е. такие, которые обычно залегают вблизи поверхности земли) могут изменять свои механические свойства при прохождении через них упругих волн с большой амплитудой

колебаний. Эти грунты состоят из мелких (до сотых и тысячных долей миллиметра) минеральных частиц, в промежутках (порах) между которыми находятся вода и газ. Сопротивление такого грунта внешней нагрузке, например весу стоящего на нем здания, осуществляется за счет огромного числа контактов между частицами, многие из которых очень слабые. При прохождении волны напряжений возбуждаются колебания частиц грунта с разными скоростями, и часть контактов (тем большая, чем выше энергия волны) разрывается. В результате прочность грунта заметно (иногда в несколько раз) снижается, а стоящее на нем сооружение может осесть, перекошиться или опрокинуться. Некоторые водонасыщенные грунты (в особенности мелкие рыхлые пески) способны разжижаться при достаточно сильном сейсмическом воздействии: при исчезновении непосредственного контакта между песчаными зернами они в какой-то момент оказываются как бы взвешенными во вмещающей их воде. Вода при этом стремится уйти с напряженного участка, но процесс этот требует некоторого времени, поскольку ограничивается водопроницаемостью грунта (среда с последействием). В результате сейсмическое разжижение грунтов обычно сопровождается разрушениями даже сейсмостойких сооружений: здания успевают «утонуть» или перекошиться, дороги разрываются на поверхности разжиженных отложений, а подземные емкости с горючим, наоборот, всплывают на поверхность, затопленную неизвестно откуда взявшейся водой. Иногда наблюдаются выбросы разжиженного грунта на поверхность с образованием песчаных кратеров. Разжижение водонасыщенных пылевато-песчаных грунтов, вызвавшее жертвы и огромный экономический ущерб, произошло, например, при сильных землетрясениях 1964 г.: 27 марта у берегов Аляски близ Анкориджа с $M=8,4$ и 16 июня в Ниигате (Япония) с $M=7,5$ [Вознесенский, 1999].

В работе [Vard, 1995] отмечается, что логично ожидать заметные проявления нелинейности на мягких песчаных грунтах в случаях, когда пиковые ускорения на скальных породах превышают пороговые значения $\sim 0,1-0,2g$. Однако, поскольку этот порог соответствует началу проявлений нелинейности, можно ожидать усиления колебаний в области высоких частот до ускорений порядка $0,3-0,5g$. Эти границы все же очень условны, но указывать более точные значения было бы неправильно, так как эффект зависит не только от состава и

мощности осадочных отложений, но и от магнитуды землетрясения и частотного состава излученных сейсмических колебаний. В работе [Silva, 1991] автор предсказывает усиление пиковых ускорений на тонких слоях песчаника при уровне ускорений порядка $1,0g$, тогда как более толстые песчаные слои такого же состава должны снижать пиковые ускорения при значениях ускорений выше пороговых значений $0,4g$.

Нелинейность реакции осадочного слоя грунтовой толщи приводит к изменению как амплитуды сейсмических колебаний, так и к изменению их спектрального состава. При достаточно высокой интенсивности колебаний начинают действовать нелинейные механизмы поглощения, которые приводят к ослаблению колебаний на высоких частотах, но, как правило, низкочастотные колебания при этом не ослабевают.

Нелинейность изменяет привычные соотношения между параметрами колебаний различных категорий грунта. Утверждение, которое содержится в действующих нормативных документах, что амплитуды ускорений для грунтов I категории в два раза ниже, а для грунтов III категории на столько же выше параметров на средних грунтах (см. табл. 6.5 ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво..., 2014]), становится неверным при высоких интенсивностях сейсмических воздействий.

Способы определения частотных характеристик грунтовых комплексов. Собственные частоты грунтовой толщи под строительной площадкой, на которых могут проявляться резонансные эффекты в сейсмических колебаниях грунта, определяются эмпирически либо теоретически. Эмпирические частотные характеристики грунта определяются с помощью прямого метода регистрации колебаний на поверхности грунта и в скважинах на кровле фундамента, по методу Накамура [Nakamura, 2000] и по методу регистрации землетрясений, специальных взрывов и микросейсм на эталонных грунтах и на различных участках (таксонометрических единицах) исследуемых площадок и др. К сожалению, все эмпирические методы требуют либо проведения длительных наблюдений, либо дорогостоящего бурения скважин, а также решения некорректных (по Адамару) обратных задач сейсмологии. Таким образом, актуальными становятся методы построения частотных характеристик грунтовой толщи на площадке путем расчета сейсмических колебаний в сейсмогеологических моделях грунтовой

толщи, построенных по данным инженерно-геологических изысканий под строительство. Расчетные методы являются экономически выгодными — малозатратными. Они широко используются в странах со слабой и невысокой сейсмичностью.

На первом этапе численного моделирования подбирается модель реакции среды, характеризующая поведение площадки при максимальных ожидаемых землетрясениях. В разное время создавались простые рациональные модели, которые характеризовали наиболее важные аспекты поведения грунтов: линейно-упругие, нелинейно-упругие, упруго-пластические, вязкоупругие и др. В настоящее время в мировой практике инженерной сейсмологии используются три класса моделей поведения грунтов: *линейные, эквивалентные линейные и нелинейные модели*. Все эти модели опираются на гистерезисные зависимости «напряжение—деформация», которые описывают как общие закономерности поведения грунтов, присутствующих в разрезе геологической среды на исследуемой площадке, так и их нелинейные свойства. Модель поведения грунта должна учитывать вид зависимости «напряжение—деформация» при его динамической нагрузке. Гистерезисные зависимости «напряжение—деформация» задаются определяемыми из экспериментов модулями сдвига и зависимостями модулей сдвига и коэффициентов поглощения от величин деформаций. Грунтовая среда обычно представляется в виде горизонтально-слоистой модели грунтовой толщи. С одной стороны, это связано с запретом строить дома и сооружения на разломных зонах, определяющих резкую латеральную неоднородность среды, а с другой — позволяет применять высокоэффективный матричный метод расчета волновых сейсмических полей [Thomson, 1950; Haskell, 1951, 1953; Аки, Ричардс, 1983; Tesseral Technology, 2000; Малицкий, Муйла, 2007].

При *линейном моделировании* модуль сдвига и коэффициент поглощения считаются постоянными для каждого слоя, независимо от уровня деформации.

При *эквивалентном линейном моделировании* поведение каждого слоя описывается моделью Кельвина — Фойгта. Нелинейные свойства грунтов учитываются путем введения зависимостей модуля сдвига и коэффициента поглощения от деформации сдвига. Зависимость «напряжение—деформация» для тела Кельвина — Фойгта при сдвиге зада-

ется уравнением [Kramer, 1996]

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma}{\partial t}, \quad (1)$$

где τ — сдвиговые напряжения, G — модуль сдвига, $\gamma = \partial u / \partial t$ — деформация сдвига, η — коэффициент вязкого поглощения.

Одномерное уравнение движения для вертикального (в направлении z) распространения поперечных волн (SH) можно представить в виде

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z}. \quad (2)$$

Подставляя уравнение (1) в уравнение (2), получим

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t}, \quad (3)$$

где ρ — плотность вещества среды, u — смещение.

Решение уравнения (3) относительно смещения u позволяет определить реакцию грунта на сейсмическое воздействие при наличии нелинейности.

При *нелинейном моделировании* можно использовать модель среды, предложенной В. Айвен [Iwen, 1967] и З. Мроз [Mroz, 1967], часто называемой сокращенно моделью ИМ. Модель предполагает использование нелинейных зависимостей «напряжение—деформация» в системе, состоящей из ряда n механических элементов, имеющих различную жесткость K_j и сопротивление скольжения R_j , причем $R_1 < R_2 < \dots < R_n$. Изначально остаточные напряжения равны нулю. При монотонно возрастающей нагрузке элемент j деформируется, пока напряжение сдвига τ не достигнет сопротивления скольжения R_j . После этого элемент j сохраняет положительное остаточное напряжение, равное R_j .

Напряжения и деформации связаны соотношением

$$d\tau/d\gamma = H,$$

где H — тангенциальный модуль сдвига, описываемый формулой

$$H = \begin{cases} H_1 = k_1, & 0 \leq \tau < R_1; \\ H_2 = (k_1^{-1} + k_2^{-1})^{-1}, & R_1 \leq \tau < R_2; \\ \dots & \\ H_{n-1} = (k_1^{-1} + k_2^{-1} + \dots + k_{n-1}^{-1})^{-1}, & R_{n-2} \leq \tau < R_{n-1}; \\ H_n = (k_1^{-1} + k_2^{-1} + \dots + k_{n-1}^{-1} + k_n^{-1})^{-1}, & R_{n-1} \leq \tau < R_n; \\ 0, & \tau = R_n. \end{cases}$$

Уравнение, описывающее динамику грунтовой среды, решается с помощью метода центральных разностей [Демидович, Марон, 1966].

Тангенциальный модуль сдвига H связан с модулем сдвига G соотношением

$$H_i = \frac{G_{i+1}\gamma_{i+1} - G_i\gamma_i}{\gamma_{i+1} - \gamma_i}, \quad i=2, \dots, n-1, \quad H_n=0,$$

и может быть рассчитан при заданной зависимости $G(\gamma)$.

Предполагая, что напряжение сдвига τ изначально равно нулю, получим $R_i = G_i\gamma_i, \quad i=1, \dots, n$.

Представленный выше алгоритм применяется для вычисления нелинейной реакции грунтовой толщи с помощью компьютерной программы NERA (Nonlinear Earthquake site Response Analyses) [Bardet, Tobita, 2001], работающей под ОС Windows XP, 07 и 10. Согласно программному комплексу DeepSoil [Hashash, 2012], при моделировании реакции среды на сейсмические воздействия нелинейное поведение грунтов учитывается путем решения динамического уравнения движения во временной области с малыми приращениями по времени:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = P(t), \quad (4)$$

где $[M]$ — матрица масс, $[C]$ — матрица демп-

фирования, $[K]$ — матрица жесткости, $\{\ddot{u}\}$ — вектор ускорения, $\{\dot{u}\}$ — вектор скоростей, $\{u\}$ — вектор перемещений, $P(t)$ — вектор нагрузки, который для исходного возбуждения можно записать в виде

$$P(t) = -[M]\{I\}\ddot{u}_g(t),$$

$\{I\}$ — единичный вектор, $\ddot{u}_g(t)$ — входная акселерограмма.

Для решения уравнения (4) используется прямой метод интеграции — метод Ньюмарка [Newmark, 1959]. Матрицы $[M]$, $[C]$, $[K]$ составляются поэтапно и обновляются при каждом шаге по времени.

Существуют и другие способы решения уравнения (4) [Юдаков, Бойков, 2013], но в настоящее время, благодаря простоте и физической обоснованности, в практике исследования частотных характеристик геологической приповерхностной среды обычно используют алгоритмы, отмеченные выше.

Компьютерные программы ProShake, NERA и DeepSoil обычно применяют для расчета частотных характеристик грунтовых комплексов под исследуемыми строительными площадками с учетом резонансных свойств грунтов и возникающих в них нелинейных эффектов. Ниже представлены результаты построения

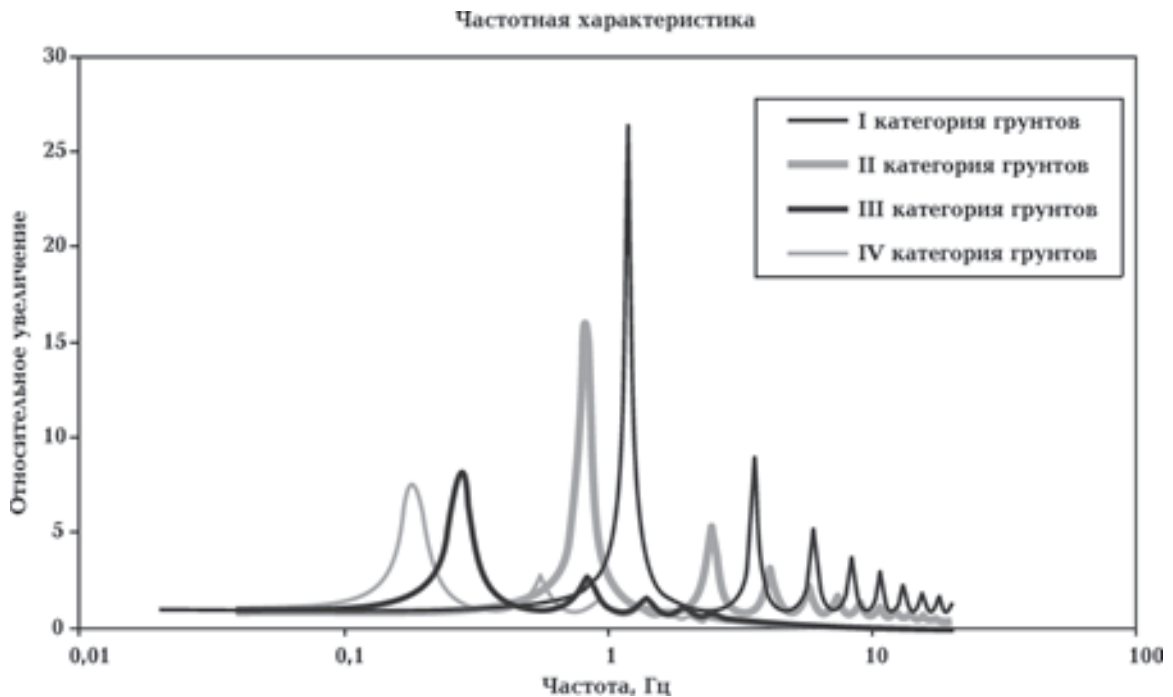


Рис. 1. Амплитудные частотные характеристики однослойной модели грунтов разных категорий по сейсмическим свойствам (по [Будівництво..., 2014]) при нормальном падении поперечной волны.

частотных характеристик для теоретических и реальных моделей грунтов под строительными площадками.

Зависимость частотной характеристики грунта от его сейсмических свойств. На рис. 1 представлены результаты моделирования амплитудных частотных характеристик среды, состоящей из одного слоя на полупространстве, в случае нормального падения на подошву слоя поперечной волны. Параметры слоя принимают значения, соответствующие грунтам от I до IV категории по сейсмическим свойствам. Категория грунта определяется по табл. 5.1 ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво..., 2014].

Для построения частотных характеристик грунтов разных категорий по сейсмическим свойствам применялся адаптированный для решения задач сейсмического микрорайонирования в условиях Украины программный продукт ProShake [Schnabel et al., 1972; ProShake..., 1998], в котором используется технология эквивалентного линейного моделирования.

По графикам на рис. 1 видно, что с ухудшением сейсмических свойств грунтов максимумы частотной характеристики смещаются в сторону низких частот. Другими словами, более рыхлые водонасыщенные грунты при прочих равных условиях характеризуются более низкочастотными колебаниями, чем, например, плотные глинистые или крупнообломочные грунты. Частоты, которым соответствуют максимальные усиления, называются резонансными. В случае совпадения такой частоты с частотой колебания здания возможно возникновение резонансного усиления сейсмических колебаний и разрушение конструкции. В упругой постановке задачи период основной формы колебаний грунтовой толщи определяется ее мощностью и скоростью объемных волн, которая возрастает с увеличением прочности грунта. При одинаковой мощности грунтовой толщи при прочих равных условиях менее прочным грунтам будет соответствовать меньшая резонансная частота колебаний.

Из рис. 1 также следует, что с ухудшением сейсмических свойств грунтов относительное усиление амплитуды колебаний уменьшается, в то время как из опыта макросейсмических исследований известно, что степень повреждений зданий на этих грунтах увеличивается. Такие явления описываются в нелинейной теории распространения сейсмических волн в моделях с нелинейными свойствами грунтов. Уменьшение относительного усиления колебаний в слабых по сейсмическим свойствам грун-

тах по сравнению со средними или скальными грунтами при больших амплитудах колебаний объясняется преобладанием влияния поглощения над усилением колебаний.

Зависимость частотной характеристики грунта от мощности слоя и интенсивности сейсмического воздействия. При наличии одного однородного слоя осадочной среды на твердом полупространстве период основной формы колебаний можно оценить по известной эмпирической формуле [Kanai, 1952]: $T=4H/V_s$, где T — период колебаний ($T=1/f$, f — частота колебаний, Гц), H — мощность толщи, V_s — скорость распространения поперечной волны.

При произвольном количестве слоев осадочной среды период основной формы колебаний можно оценить по формулам В.1 и В.2 Приложения В [Будівництво..., 2014]. В них учтены значения упругих параметров слоев и полупространства, но не учитывается ни литологический состав слоев, ни реологические свойства среды, хотя еще в 1961 г. известный сейсмолог А. Л. Левшин [Левшин, 1962] отмечал, что разделение влияния осадочной толщи, состоящей из галечников и песков, возможно «путем исследования их видимых частот». Дело в том, что галечники в водонасыщенном состоянии (с песчаным заполнителем более 30 %) и пески характеризуются близкими по величине скоростями распространения в них продольной и поперечной волны. Кроме того, отношение V_s/V_p также не позволяет однозначно разделить их. С другой стороны, по данным спектрального анализа ширина спектрального диапазона регистрируемых сейсмических колебаний на поверхности среды, состоящей из песков, больше ширины спектрального диапазона колебаний галечников в 1,5—2 раза. При этом вид спектральной кривой является вполне устойчивой характеристикой [Заалишвили, 2009].

Для демонстрации влияния мощности грунтовой толщи на особенности формирования спектра колебаний рассчитаны амплитудные частотные характеристики однотипных осадочных грунтов с разной мощностью при слабых сейсмических воздействиях ($A_{\max}=0,07g$). Их результаты представлены на рис. 2. Видно, что с увеличением мощности слоя максимум его частотной характеристики смещается в сторону низких частот.

На рис. 3 приведен результат расчета амплитудных частотных характеристик аналогичного осадочного слоя при уровне сейсми-

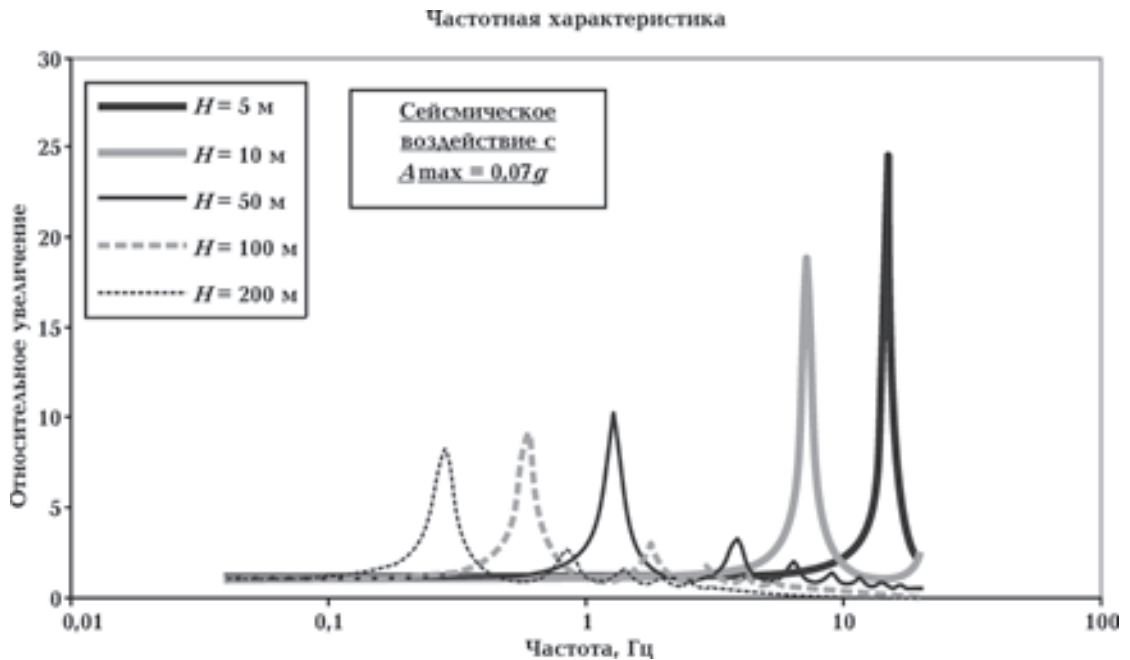


Рис. 2. Амплитудные частотные характеристики грунтовых комплексов различной мощности, рассчитанные для случая падения с нижнего полупространства сейсмического сигнала с $A_{max}=0,07g$.

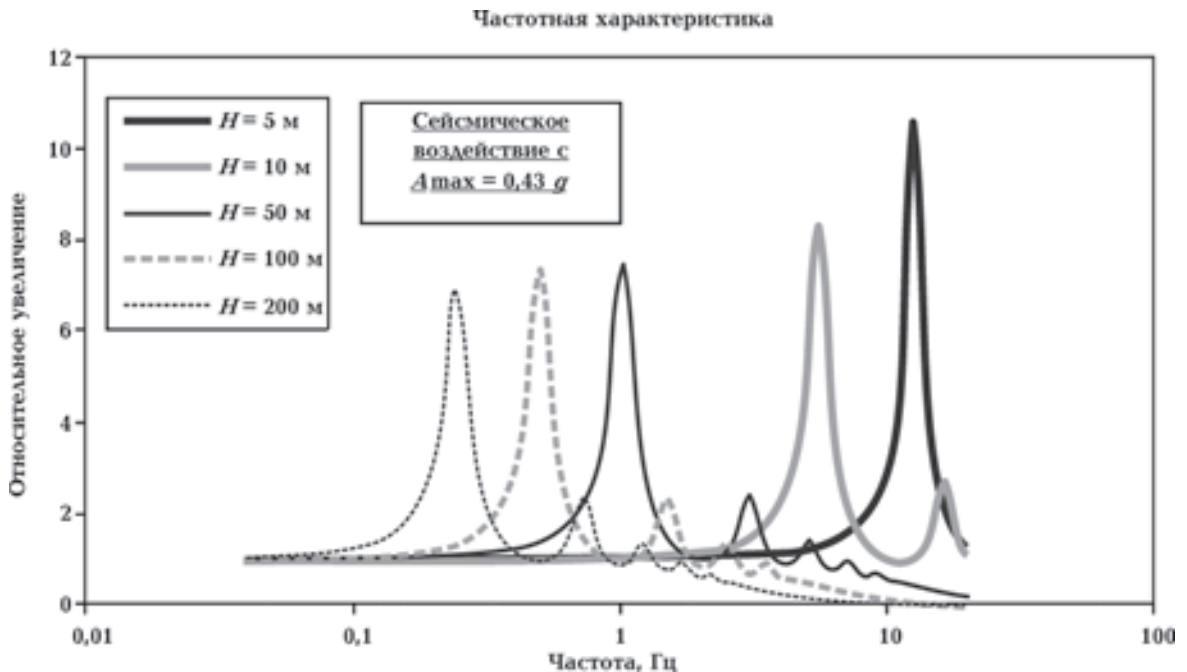


Рис. 3. Амплитудные частотные характеристики грунтовых комплексов различной мощности, рассчитанные для случая падения с нижнего полупространства сейсмического сигнала с $A_{max}=0,43g$.

ческого воздействия с $A_{max}=0,43g$. Из рис. 2 и 3 следует, что независимо от величины сейсмического воздействия сохраняется обратная связь между преобладающей частотой и мощностью слоя, но относительное усиление при более интенсивном воздействии ($A_{max}=0,43g$)

становится меньше, чем при слабом сейсмическом воздействии ($A_{max}=0,07g$). Наблюдаемое уменьшение усиления объясняется большим затуханием. При интенсивном сейсмическом воздействии проявляется нелинейность, которая приводит к снижению относительного

усиления колебаний грунтом. Максимумы амплитудной частотной характеристики на рис. 3 сдвинуты в низкочастотную область относительно максимумов амплитудной частотной характеристики, представленной на рис. 2. Следовательно, чем сильнее сейсмическое воздействие и меньше мощность слоя грунтовой толщи, тем больше нарушается справедливость равенств В.1 и В.2, рекомендуемых для расчета резонансных периодов грунтовых комплексов в приложении В к нормативному документу [Будівництво..., 2014].

Отметим также, что при относительно слабых сейсмических воздействиях грунты ведут себя по законам классической теории упругости.

Сравнение амплитудных частотных характеристик грунтовых комплексов под строительными площадками Украины, рассчитанных с учетом нелинейных свойств грунтов. Ниже представлены амплитудные частотные характеристики грунтовых толщ под строительными площадками в Киеве и Одессе, сложенных одинаковыми по сейсмическим свой-

ствам грунтами. В табл. 2 представлен пример вертикально-неоднородной модели грунтовой толщи под строительной площадкой по ул. Генерала Цветаева, 11 в Одессе. Модель характеризуется мощностью слоев, литологическим составом, скоростями сейсмических волн, плотностью среды, декрементами поглощения продольных и поперечных волн.

На рис. 4, а представлены амплитудные частотные характеристики грунтовых комплексов под строительными площадками по ул. Глубочицкая, на Оболонском проспекте и на пересечении улиц Красногвардейской и Краковской в Киеве. На рис. 4, б — амплитудные частотные характеристики грунтовой толщи под строительными площадками по ул. Армейская, 8; Генерала Цветаева, 11 и Малиновского, 16/1 в Одессе. Частотные характеристики построены с применением программного комплекса Proshake [Schnabel et al., 1972; ProShake..., 1998], в которой реализована технология эквивалентного линейного моделирования сейсмических колебаний в среде с реологическими свойствами. В рамках этой

Т а б л и ц а 2. Модель строения геологической среды под строительной площадкой в Одессе по ул. Генерала Цветаева, 11

Литологический состав	Интервал глубин, м	Скорость сейсмических волн		Декременты поглощения сейсмических волн		ρ , г/см ³
		V_P , м/с	V_S , м/с	V_P	V_S	
Почвенно-растительный слой	0—1,0	260	210	1,5	1,5	1,5
Суглинок тяжелый, полутвердый	1,0—3,40	380	290	0,3	0,5	1,78
Суглинок легкий текучей консистенции	3,40—8,30	320	220	0,5	0,5	1,85
Суглинок тяжелый, полутвердый	8,30—12,20	450	380	0,3	0,3	1,88
Суглинок серый текучепластичный	12,2—14,30	430	350	0,2	0,25	1,97
Суглинок красно-бурый	14,30—23,6	550	380	0,1	0,15	1,91
Известняк	23,6—36,0	2200	900	0,08	0,1	2,2
Глина мзотическая	36,0—48,0	1100	700	0,1	0,2	2,0
Глина (N_{1s}), переслаивание с известняками	48,0—96,0	1300	800	0,08	0,12	2,0
Известняки, глина	96,0—180,0	1600	1000	0,06	0,12	2,1
Мелоподобный мергель, писчий мел	180,0—871,0	1800	1200	0,06	0,06	2,2
Песчаники, аргиллитоподобные глины	871,0—1471,0	3000	1600	0,01	0,06	2,6
Граниты, биотитовые гнейсы	1471,0—∞	5000	3200	0,03	0,06	2,9

технологии грунт рассматривался как линейный вязкоупругий материал. Его нелинейные свойства учитываются путем использования эмпирических зависимостей модуля сдвига и коэффициента поглощения от величины деформации сдвига. Эти зависимости подбирались для каждого слоя с учетом его литологического состава и глубины залегания.

Литологический состав и физические параметры слоев грунтовой толщи определялись по данным инженерно-геологических изысканий под строительство для каждой отдельной площадки.

Из рис. 4 видно, что амплитудные частотные характеристики под разными строительными площадками существенно различаются между

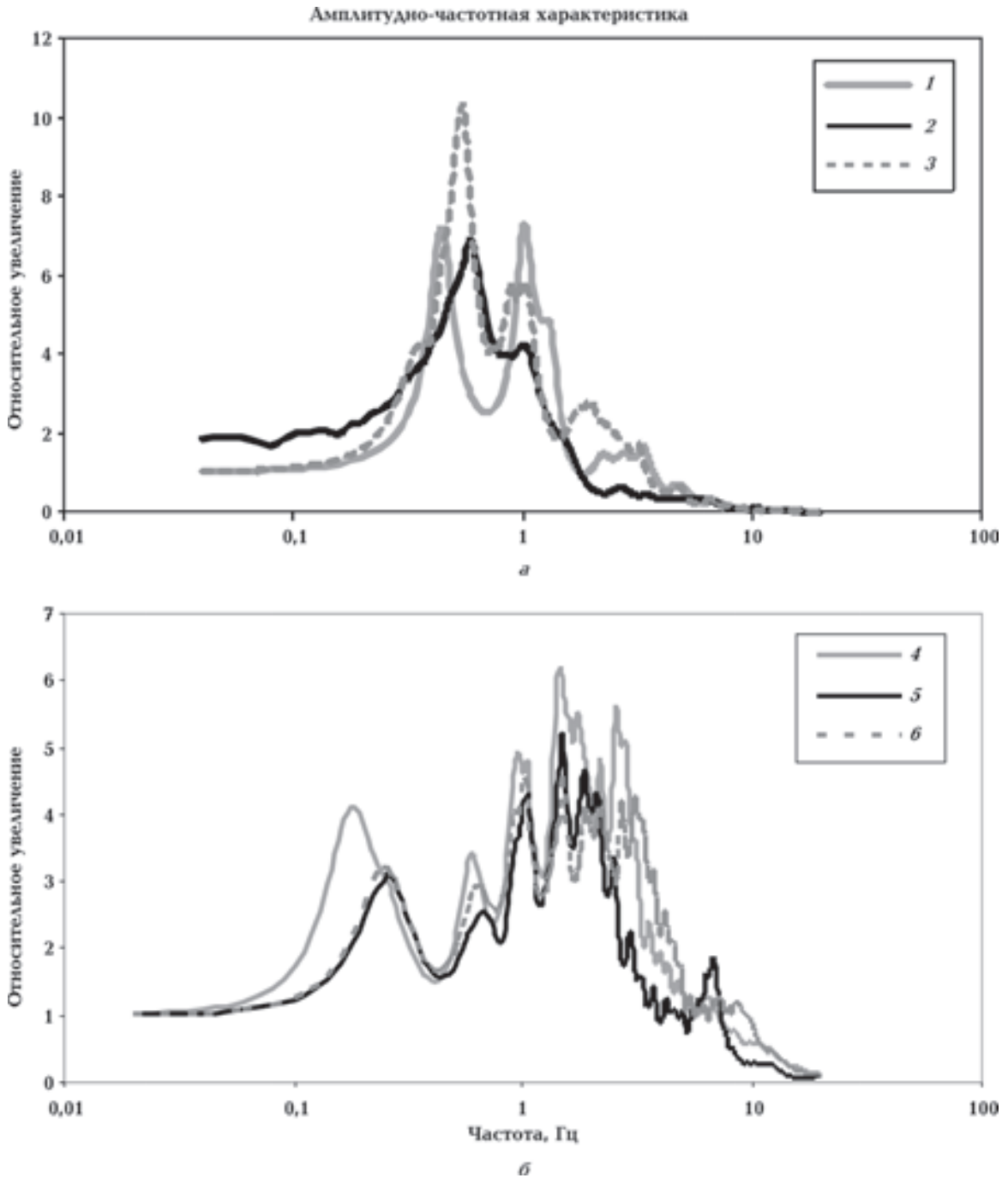


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики грунтов под строительными площадками в Киеве (а): 1 — по ул. Глубоцицкая, 2 — на Оболонском проспекте, 3 — на пересечении улиц Красногвардейской и Краковской; в Одессе (б): 4 — по ул. Армейская, 8, 5 — по ул. Генерала Цветаева, 11, 6 — по ул. Малиновского, 16/1.

собой. Частотные характеристики грунтов под строительными площадками Одесской обл. имеют большее количество ярко выраженных максимумов и более широкую полосу частот возможного усиления колебаний. Максимумы амплитудных частотных характеристик наблюдаются в диапазоне от 0,1 до 10 Гц. Следовательно, при сейсмостойком строительстве в Одесской обл. следует проводить детальные исследования резонансных свойств грунтов под строительство независимо от высотности зданий, так как собственные колебания как одноэтажных, так и высотных зданий обычно лежат в этих пределах.

Амплитудные частотные характеристики грунтов под строительными площадками в Киеве характеризуются более узким частотным диапазоном. Ярко выраженные максимумы наблюдаются в частотной области от 0,35 до 2 Гц. Этот низкочастотный диапазон возможного усиления колебаний обязательно следует учитывать при проектировании высотных сейсмостойких зданий в Киеве, так как наибольшую опасность здесь представляют низкочастотные колебания от очагов сильных подкорковых землетрясений, происходящих в Восточных Карпатах (зона Вранча, Румыния). Более того, именно на сравнительно больших расстояниях от эпицентра, вследствие эффектов расхождения и переизлучения волн на неоднородностях транзитной среды на трассе «очаг—кровля фундамента», длительность интенсивных сейсмических колебаний увеличивается, благодаря чему возрастает опасность резонансного накопления сейсмической энергии в среде под площадкой. Кроме того, при интенсивных длительных воздействиях увеличивается возможность разжижения грунта и, как следствие, уменьшение его несущей способности.

Следует отметить, что при оценке сейсмической опасности строительных площадок проектировщики часто пытаются использовать только данные о сейсмических свойствах грунтов, соответствующих табл. 5.1 из [Будівництво..., 2014] и получаемых при инженерно-геологических изысканиях под строительство. Как следует из приведенных модельных расчетов частотных характеристик среды, реальные грунтовые условия под строительной площадкой зависят не только от категории сейсмических свойств, но и от совокупной мощности осадочной толщи, физических свойств консолидированного фундамента, параметров отдельных слоев: их литологического состава,

физических и реологических свойств. Следует также отметить, что фильтрующие свойства грунта зависят также от конфигурации земной поверхности, геометрии границ раздела отдельных слоев и поверхности консолидированного фундамента (скального полупространства).

Из изложенного следует, что на сейсмическую опасность площадки существенное влияние оказывают грунтовые условия и, в частности, резонансные (фильтрационные) свойства осадочной толщи. Анализ опубликованных материалов [Ишихара, 2006; Вознесенский, 1999] показывает, что при ускорениях сейсмических колебаний $0,1g$, что в среднем соответствует 7-балльным сейсмическим воздействиям, начинается проявление нелинейных эффектов, так как при этом резко падает прочность рыхлых грунтов, их структурные связи ослабевают, а скорости поперечных волн уменьшаются. Провести резкую границу между понятием плотный и рыхлый грунт в этом случае затруднительно. Дальнейшее совершенствование методики сейсмического микрорайонирования для целей сейсмостойкого проектирования и строительства требует более детального учета резонансных и реологических свойств грунтов под каждой застраиваемой или эксплуатационной площадкой в сейсмических районах страны.

Выводы. Разрушения и повреждения сейсмостойких сооружений при землетрясениях связаны не только с низким качеством строительства и неблагоприятными грунтовыми условиями площадок их размещения, но и с совпадением собственных периодов (частот) сооружений с собственными периодами амплитудных частотных характеристик грунтовой толщи (резонансные эффекты), разжижением грунтов или частичной потерей их несущей способности (нелинейные эффекты).

С помощью исследования реакции моделей грунта на сейсмические воздействия установлено, что одинаковые по мощности, но различные по сейсмическим свойствам (см. табл. 5.1 ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво..., 2014]) типы грунтов характеризуются различными частотами, на которых они ослабляют или усиливают сейсмические колебания. Частоты, которым соответствуют максимальные усиления сейсмического сигнала (резонансные частоты), зависят от мощности и количества слоев осадочной толщи, их мощности и литологического состава, геометрии границ, а при больших землетрясениях, вследствие возникновения

нелинейных эффектов, и от интенсивности сейсмических воздействий.

Теоретическое моделирование реакции грунтовой толщи под различными реальными объектами показало, что с ухудшением сейсмических свойств грунтов, а также при увеличении мощности осадочного слоя максимумы амплитудных частотных характеристик смещаются в низкочастотную область. На более рыхлых водонасыщенных грунтах при прочих равных условиях наблюдаются более низкочастотные колебания, чем, например, на плотных глинистых или крупнообломочных грунтах. С увеличением интенсивности сейсмических воздействий проявляется нелинейность реакции грунта, максимумы амплитудных частотных характеристик смещаются в низкочастотный диапазон, при этом наблюдается относительное ослабление амплитуды сейсмических колебаний.

При сейсмостойком строительстве в Одесской обл. следует проводить детальные исследования резонансных свойств грунтов под строительство независимо от высотности зданий, поскольку резонансное усиление колебаний здесь, как следует из результатов построения теоретических частотных характеристик, следует ожидать в диапазоне частот от 0,1 до 10 Гц, что соответствует частотам собственных колебаний как одноэтажных, так и высотных зданий.

Сильные подкоровые землетрясения из очаговой зоны Вранча (Румыния), которые представляют опасность на всей территории Украины, генерируют волновой пакет с широким частотным диапазоном и длительностью в десятки минут. Они способны, несмотря на затухание высокоэнергетических высокочастотных составляющих колебаний на значительном расстоянии от очага, на территории нашей страны вызывать опасное резонансное усиление колебаний в высотных домах и больших сооружениях.

Список литературы

- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. Москва: Мир. 1983. 520 с.
- Алешин А. С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. Москва: ООО «Светоч Плюс», 2010. 293 с.
- Будівництво в сейсмічних районах України. ДБН В.1.1-12:2014. Київ: Мінрегіонбуд України, Укрархбудінформ, 2014. 110 с.
- Вознесенский Е. А. Динамическая неустойчивость грунтов. Москва: УРСС Эдиториал, 1999. 263 с.
- Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики. Москва: Наука, 1966. 664 с.
- Заалишвили В. Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. Москва: Наука, 2009. 350 с.
- Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. РСН 65-87. Москва: Госстрой РСФСР, 1988. 14 с.

Амплитудные частотные характеристики грунтов под строительными площадками в Киеве характеризуются более узким частотным диапазоном. Ярко выраженные максимумы наблюдаются в области от 0,35 до 2 Гц. Этот сравнительно низкочастотный диапазон возможного усиления колебаний обязательно следует учитывать при проектировании высотных сейсмостойких зданий в Киеве, так как наибольшую опасность для высотных зданий здесь представляют именно низкочастотные колебания от подкоровых очагов сильных землетрясений из зоны Вранча. Более того, именно на сравнительно больших расстояниях от эпицентра длительность колебаний увеличивается вследствие эффектов расхождения и переизлучения волн на неоднородностях транзитной среды, благодаря чему возрастает возможность резонансного накопления сейсмической энергии в грунтах под площадкой. При интенсивных длительных воздействиях увеличивается также возможность разжижения грунта и, как следствие, уменьшение его несущей способности.

Дальнейшее совершенствование методики сейсмического микрорайонирования для целей сейсмостойкого проектирования и строительства требует более детального учета резонансных и реологических свойств грунтов под каждой застраиваемой или эксплуатационной площадкой в сейсмических районах страны. Для правильного учета этих эффектов при сейсмическом микрорайонировании необходимо дальнейшее совершенствование методики проведения инженерно-геологических изысканий под строительство (см. [Інженерні..., 2008], предусматривающее не только определение количественных значений упругих модулей, характеризующих геологическую среду под площадкой, но и их изменений с частотой колебаний и величиной напряжения в грунтах.

- Инженерні вишукування для будівництва*. ДБН А.2.1-1-2008. Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. 78 с.
- Ишихара К.* Поведение грунтов при землетрясениях. Санкт-Петербург: НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2006. 383 с.
- Кендзера О. В.* Сейсмічна небезпека і сейсмічний захист в Україні. *Укр. географ. журн.* 2015. № 3. С. 9—15. <http://dx.doi.org/10.15407/ugz2015.03>.
- Левшин А. Л.* Применение сейсмических методов исследований при инженерно-геологических изысканиях. Москва: ВСЕГИНГЕО, 1962. Вып. 20. 42 с.
- Малицький Д. В., Муйла О. О.* Про застосування матричного методу і його модифікацій для дослідження поширення сейсмічних хвиль у шаруватому середовищі. В кн.: *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*. Київ, 2007. С. 124—136.
- Павленко О. В.* Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет. Москва: Научный мир, 2009. 260 с.
- Югаков А. А., Бойков В. Г.* Численные методы интегрирования уравнений движения многокомпонентных механических систем, основанные на методах прямого интегрирования уравнений динамики метода конечных элементов. *Вестн. Удмуртск. ун-та. Матем. Мех. Компьютер. науки*. 2013. Вып. 1. С. 131—144.
- Bard P.-Y.*, 1995. Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues: *Proc. of 10th European Conference on Earthquake Engineering*. Vienna, Austria. Rotterdam: Balkema, P. 305—324.
- Bardet J. P., Tobita T.*, 2001. NERA. A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered Soil Deposits. Los Angeles: Univ. of Southern California. 44 p.
- Iwan W. D.*, 1967. On A Class of Models for the Yielding Behavior of Continuous and Composite Systems. *J. Appl. Mech.* ASME 34, 612—617.
- Hashash Y.*, 2012. DeepSoil User Manual and Tutorial. Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign. Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign. 107 p.
- Haskell N. A.*, 1951. Asymptotic Approximation for the Normal Modes in Sound Channel Wave Propagation. *J. Appl. Phys.* 22, 157—168.
- Haskell N. A.*, 1953. The dispersion of surface waves on a multilayered media. *Bull. Seism. Soc. Am.* 43, 17—34.
- Kanai K.*, 1952. Relation between the nature of surface layer and the amplitudes of earthquake motions. *Bull. Earth. Res. Inst., Tokyo Univ.* 30, 31—37.
- Kenzera O.*, 2015. Seismic hazard and seismic protection in Ukraine. In: *Earth reality along the silk road and scientific cooperation*. Atatürk Üniversitesi: ER-ZURUM, P. 61—72.
- Kramer S. L.*, 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. N. J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 672 p.
- Marmarelis V. Z.*, 2004. Nonlinear Dynamic Modeling of Physiological Systems. Wiley-IEEE Press, Series on Biomedical Engineering, 541 p.
- Mróz Z.*, 1967. On The 'Description of Anisotropic Work hardening. *J. Mech. Phys. Solids.* 15, 163—175.
- Nakamura Y.*, 2000. Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications: *Proc. of 12th World Conf. on Earthquake Engineering, Paper 2656*. 8 p.
- Newmark N. M.*, 1959. A Method of Computation for Structural Dynamics. *J. Geotech. Eng. Division* 85, 67—94.
- ProShake* Ground Response Analysis Program, 1998. Version 1.1. User's Manual, Washington, USA, 54 p.
- Silva W. J.*, 1991. Global characteristics and site geometry: Proceedings NSF/EPRI Workshop on Dynamic Soil Properties and Site Characterization. EPRI NP-7337. Electric Power Res. Inst., Chapter 6. P. 1—20.
- Schnabel P. B., Lysmer J., Seed H. B.*, 1972. SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report No. EERC 72-12. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 102 p.
- Tesseral Technology, Introduced in Tesseral Pro v. 4.1.7, 2015. 5 p. <http://www.tesseral-geo.com>.
- Thomson W. T.*, 1950. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. *J. Appl. Phys.* 21, 89—93.

Influence of resonance and nonlinear properties of soils on seismic hazards of construction areas

© A. V. Kendzera, Yu. V. Semenova, 2016

The article discusses the need to take into account the resonance and nonlinear phenomena in soils for the seismic micro zoning of building and operating sites. Resonance and nonlinear phenomena are closely related to each other and depend on the structure of the medium under the site, and the intensity of seismic effects. Examples of what these phenomena are a common cause of destruction and damage of earthquake-resistant structures during earthquakes are presented. The methods that allow at a modern level to count the frequency characteristics of soil models taking into account its non-linear and resonance properties are reviewed. The results of the comparative analysis of theoretical calculations of the frequency characteristics of soil layered models with different thickness and different seismic properties are supplied. It has been shown that appearance of the nonlinear properties of the soil depends on its physical properties and stress condition. A comparison of the calculated frequency characteristics of ground systems taking into account the rheological properties for a variety of construction sites in the Odessa area in Kiev town are provided. The influence of various factors on the spectral contents and the value of oscillation of the upper section of the geological environment at the construction site are analyzed. The conditions of occurrence in it of dangerous resonance phenomena are formulated.

Key words: seismic microzonation, nonlinear soil behavior, resonance properties of soils, frequency characteristics of soils, equivalent linear model.

References

- Aki K., Richards P., 1983. Quantitative Seismology: Theory and Methods. Moscow: Mir, 520 c. (in Russian).
- Aleshin A. S., 2010. Seismic micro zoning especially important objects. Moscow: ООО «Svetoch Plus», 293 p. (in Russian).
- Construction in seismic regions of Ukraine, 2014. DBN V.1.1-12:2014. Kyiv: Minrehionbud Ukrayiny, Ukrarkhbudinform, 110 p. (in Ukrainian).
- Voznesenskiy E. A., 1999. Dynamic instability of soils. Moscow: Editorial URSS, 263 p. (in Russian).
- Demidovich B. P., Maron I. A., 1966. Fundamentals of Computational Mathematics. Moscow: Nauka, 664 p. (in Russian).
- Zaalishvili V. B., 2009. Seismic micro zoning of territories of cities, settlements and large construction sites. Moscow: Nauka, 350 p. (in Russian).
- Engineering survey for construction. Seismic micro zoning. Technical performance requirements, 1988. RSN 65—87. Moscow: State Committee for Construction of the RSFSR, 14 p. (in Russian).
- Engineering survey for construction, 2008. DBN A.2.1-1-2008. Kyiv: Minrehionbud Ukrayiny, 78 p. (in Ukrainian).
- Ishikhara K., 2006. The behavior of soils during earthquakes. St. Petersburg: NPO «Georekonstruktsiya-Fundamentproekt», 383 p. (in Russian).
- Kendzera O. V., 2015. Seismic hazard and seismic protection in Ukraine. *Ukrayins'kyi heohrafichnyy zhurnal* (3), 9—15. <http://dx.doi.org/10.15407/ugz2015.03>. (in Ukrainian).
- Levshin A. L., 1962. Application of seismic methods of research in geological engineering surveys. Moscow: VSEGINGEO, is. 20, 42 p. (in Russian).
- Malyts'kyi D. V., Muyla O. O., 2007. On the application of the matrix method and its modifications to the study of seismic waves in layered media. In: *Theoretical and applied aspects of geoinformatics*. Kiev, P. 124—136 (in Ukrainian).
- Pavlenko O. V., 2009. Seismic waves in the ground layers: a non-linear behavior of the soil during strong earthquakes in recent years. Moscow: Nauchnyy Mir, 260 p. (in Russian).
- Yudakov A. A., Boykov V. G., 2013. Numerical methods for integrating the equations of motion of mechanical multicomponent systems based on the method of direct integration of the equations of the dynamics of finite element method. *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Kompyuternye nauki* (is. 1), 131—144 (in Russian).
- Bard P.-Y., 1995. Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues: *Proc. of 10th European Conference on Earthquake Engineering*. Vienna, Austria. Rotterdam: Balkema, P. 305—324.

- Bardet J. P., Tobita T.*, 2001. NERA. A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered Soil Deposits. Los Angeles: Univ. of Southern California. 44 p.
- Iwan W. D.*, 1967. On A Class of Models for the Yielding Behavior of Continuous and Composite Systems. *J. Appl. Mech.* ASME 34, 612—617.
- Hashash Y.*, 2012. DeepSoil User Manual and Tutorial. Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign. Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign. 107 p.
- Haskell N. A.*, 1951. Asymptotic Approximation for the Normal Modes in Sound Channel Wave Propagation. *J. Appl. Phys.* 22, 157—168.
- Haskell N. A.*, 1953. The dispersion of surface waves on a multilayered media. *Bull. Seism. Soc. Am.* 43, 17—34.
- Kanai K.*, 1952. Relation between the nature of surface layer and the amplitudes of earthquake motions. *Bull. Earth. Res. Inst., Tokyo Univ.* 30, 31—37.
- Kendzera O.*, 2015. Seismic hazard and seismic protection in Ukraine. In: *Earth reality along the silk road and scientific cooperation*. Atatürk Üniversitesi: ERZURUM, P. 61—72.
- Kramer S. L.*, 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. N. J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 672 p.
- Marmarelis V. Z.*, 2004. Nonlinear Dynamic Modeling of Physiological Systems. Wiley-IEEE Press, Series on Biomedical Engineering, 541 p.
- Mróz Z.*, 1967. On The 'Description of Anisotropic Work hardening. *J. Mech. Phys. Solids.* 15, 163—175.
- Nakamura Y.*, 2000. Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications: *Proc. of 12th World Conf. on Earthquake Engineering, Paper 2656.* 8 p.
- Newmark N. M.*, 1959. A Method of Computation for Structural Dynamics. *J. Geotech. Eng. Division* 85, 67—94.
- ProShake* Ground Response Analysis Program, 1998. Version 1.1. User's Manual, Washington, USA, 54 p.
- Silva W. J.*, 1991. Global characteristics and site geometry: Proceedings NSF/EPRI Workshop on Dynamic Soil Properties and Site Characterization. EPRI NP-7337. Electric Power Res. Inst., Chapter 6. P. 1—20.
- Schnabel P. B., Lysmer J., Seed H. B.*, 1972. SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report No. EERC 72-12. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 102 p.
- Tesseral Technology, Introduced in Tesseral Pro v. 4.1.7, 2015. 5 p. <http://www.tesseral-geo.com>.
- Thomson W. T.*, 1950. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. *J. Appl. Phys.* 21, 89—93.