

УДК 624.042.8

канд. техн. наук, профессор Банах В. А.,
канд. техн. наук, доцент Банах А. В.,
Запорожская государственная инженерная академия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ «ЗДАНИЕ (СООРУЖЕНИЕ) – ОСНОВАНИЕ» ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЧЕРЕЗ ГРУНТОВЫЕ ОСНОВАНИЯ

Приведены результаты исследований динамических воздействий, расположенных за пределами строительных объектов, и механизмов их передачи через грунтовые основания. Предложена модель грунтового основания для учета его взаимодействия со зданиями и сооружениями для анализа напряженно-деформированного состояния их конструкций.

Ключевые слова: динамические воздействия, здания и сооружения, грунтовые основания, расчетные модели, напряженно-деформированное состояние, сложные инженерно-геологические условия

Актуальность проблемы. В последнее время отечественные и зарубежные исследователи проявляют повышенный интерес к проблеме учета взаимодействия зданий и сооружений с грунтовыми основаниями, в том числе при динамических воздействиях [1–7].

К числу динамических воздействий, передаваемых на здания и сооружения через грунтовые основания, относятся:

– сейсмические воздействия, имеющие характеристики продольных волн из-за удаленности эпицентров землетрясений в сейсмических районах;

– динамические воздействия, передаваемые через дорожное покрытие и поверхностные слои грунта: все виды наземного автомобильного, рельсового и электротранспорта, строительной техники, технологического оборудования вне зданий;

– динамические воздействия, передаваемые через грунтовые толщи: от подземного транспорта (метро), строительной техники ударного действия (например, забивка свай в котлованах, уплотнение грунта тяжелыми трамбовками, в том числе при устройстве грунтовых подушек);

– искусственное улучшение свойств грунтов в сложных инженерно-геологических условиях гидровзрывом, взрывные работы в местах добычи полезных ископаемых и другие.

Цель исследования. В связи с этим были выполнены численные исследования расчетных моделей системы «здание (сооружение) – основание», целью которых было выявление закономерностей распространения колебаний в

моделях грунтових массивов, особенностей учета динамических воздействий в зависимости от расстояния их источника от рассчитываемого объекта, принципов моделирования динамических воздействий при их передаче через грунт и возможностей обоснованного упрощения моделей взаимодействия зданий и сооружений с грунтовыми основаниями.

Материалы исследования. Для изучения механизмов передачи динамических воздействий через грунт примем расчетную модель основания в виде сосредоточенных масс, соединенных специальными конечными элементами, моделирующими нелинейные односторонние связи, с приложением динамических воздействий за пределами здания или сооружения, для получения динамических характеристик основания методами прямого интегрирования систем дифференциальных уравнений движения.

Такая модель дает возможность учесть подробным образом структуру основания, его инерционные характеристики, смоделировать инженерные сооружения сетей и конструкции, находящиеся в грунте, а также исследовать динамическую реакцию системы «здание (сооружение) – основание» во временной области, и является в определенной степени развитием и реализацией статико-динамической (инерционной и упруго-диссипативной) модели основания, предложенной В. В. Кулябко [4].

Вид фрагмента – плоского комплекта – предложенной модели приведен на рис. 1. Плоский комплект усовершенствован до пространственного, на основе которого составлена динамическая расчетная модель основания.

Для этих исходных данных была сформирована расчетная модель здания с грунтовым массивом, при этом учтена односторонняя упругая связь конструкций фундаментов с основанием специальными конечными элементами. Учтена также деформированная схема здания по данным обследования. Расчетная модель приведена на рис. 2.

Проверив адекватность рассчитываемой модели, определим зависимость динамических параметров конструктивных элементов от расстояния до источника колебаний, расположенного вне здания, при передаче воздействий через грунтовое основание. В результате серии расчетов получены виброграммы амплитуд перемещений, скоростей и ускорений в зоне контактных элементов фундаментов и основания на разных расстояниях от источника колебаний. Характерные виброграммы приведены на рис. 3–5.

Был проведен анализ изменения амплитуд перемещений контактных элементов модели здания при изменении расстояния до источника колебаний и направления распространения колебаний в модели грунтового массива. При этом для сопоставления принята методика, предложенная в [8].

Расчет амплитуд вертикальных (горизонтальных) колебаний грунта

соответственно при вертикальных (горизонтальных) колебаниях источника динамических воздействий в соответствии с [8] производится по формуле (1).

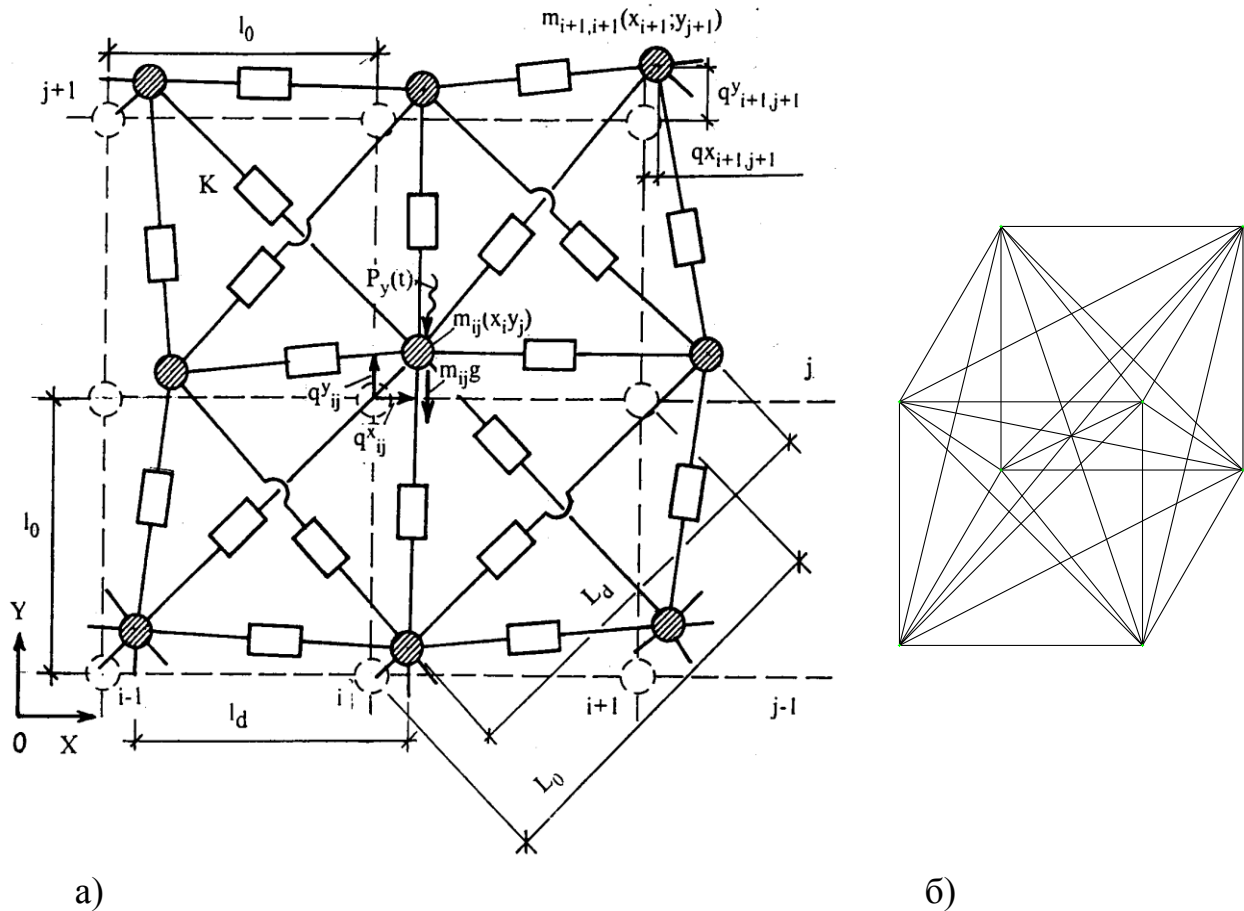


Рис. 1 – Фрагменты статико-динамической (инерционной и упруго-диссипативной) модели основания: а) плоский комплект [4]; б) пространственный комплект

$$A_{v,h} = A_{0,v,h} \left\{ \frac{1}{\delta [1 + (\delta - 1)^2]} + \frac{\delta^2 - 1}{(\delta^2 + 1) \sqrt{3\delta}} \right\} \quad (1)$$

где $A_{v,h}$ – амплитуда вертикальных (горизонтальных) колебаний грунта на поверхности в точке, расположенной на расстоянии r от оси источника волн в грунтовом основании;

$A_{0,v,h}$ – амплитуда свободных или вынужденных вертикальных (горизонтальных) колебаний источника в уровне его подошвы.

$$\delta = r / r_0,$$

где r – расстояние от вертикальной оси источника колебаний до точки на поверхности грунта, для которой определяется амплитуда колебаний, м;

r_0 – приведенный радиус подошвы источника колебаний, м.

$$r_0 = \sqrt{A / \pi},$$

где A – площадь подошвы источника, м^2 .

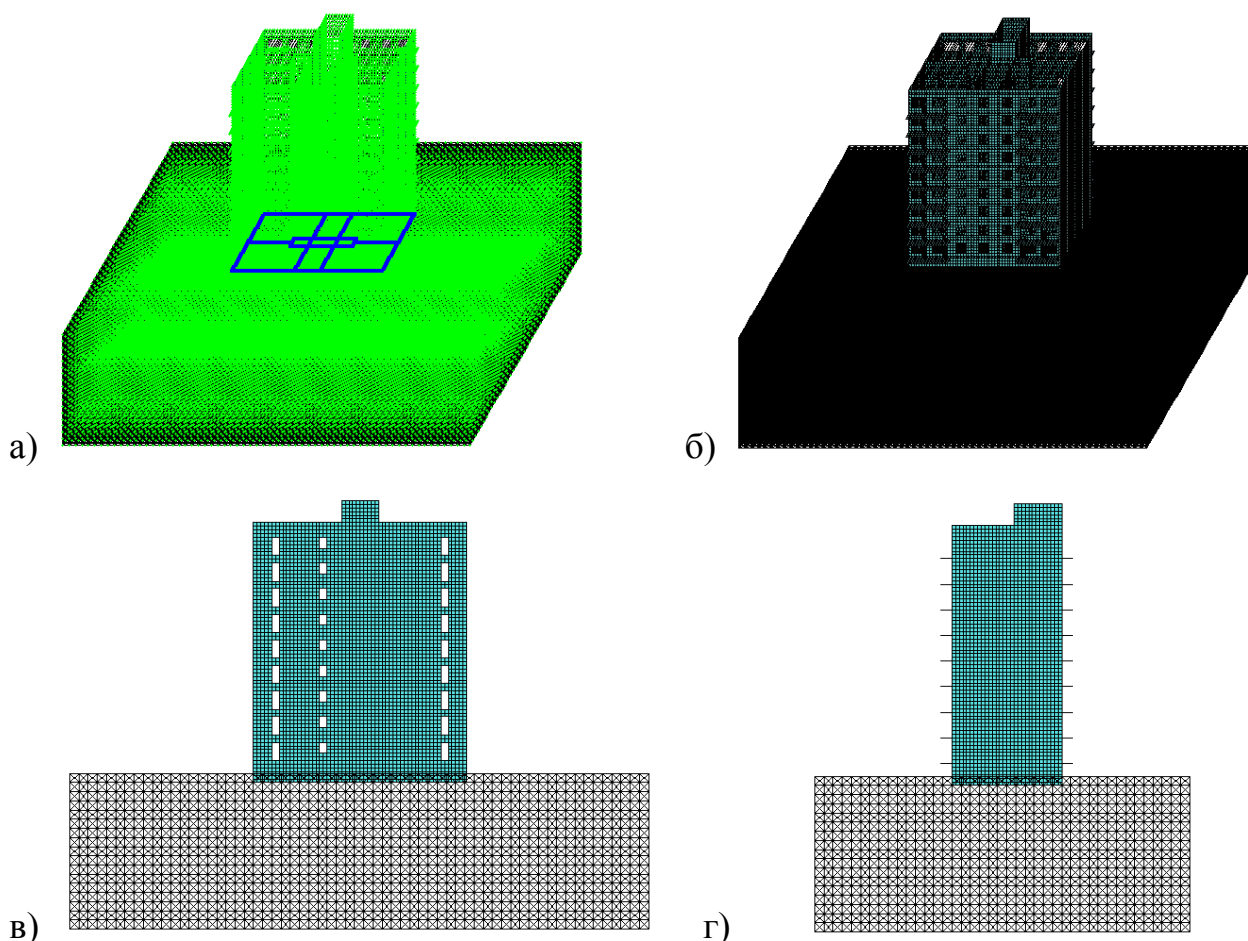


Рис. 2 – Расчетная модель системы «здание – основание» с использованием пространственных комплектов: а) «каркасная» структура (аксонометрия); б) твердотельная модель (аксонометрия); в) фронтальный вид; г) боковой вид

Частоту волн, распространяющихся в грунте, следует принимать равной частоте колебаний источника. Формула (1) является приближенной. В ней не учитываются свойства грунтов, слагающих основание площадки, форма подошвы источника колебаний, вид и частотные характеристики динамического воздействия. По данным натурных наблюдений формула (1) дает неточные значения вертикальных и горизонтальных амплитуд колебаний грунта, поэтому она рекомендована для ориентировочных расчетов [8]. В особо ответственных случаях рекомендуется учитывать результаты экспериментальных и натурных исследований для уточнения методики прогнозирования колебаний грунта, распространяющихся от источника.

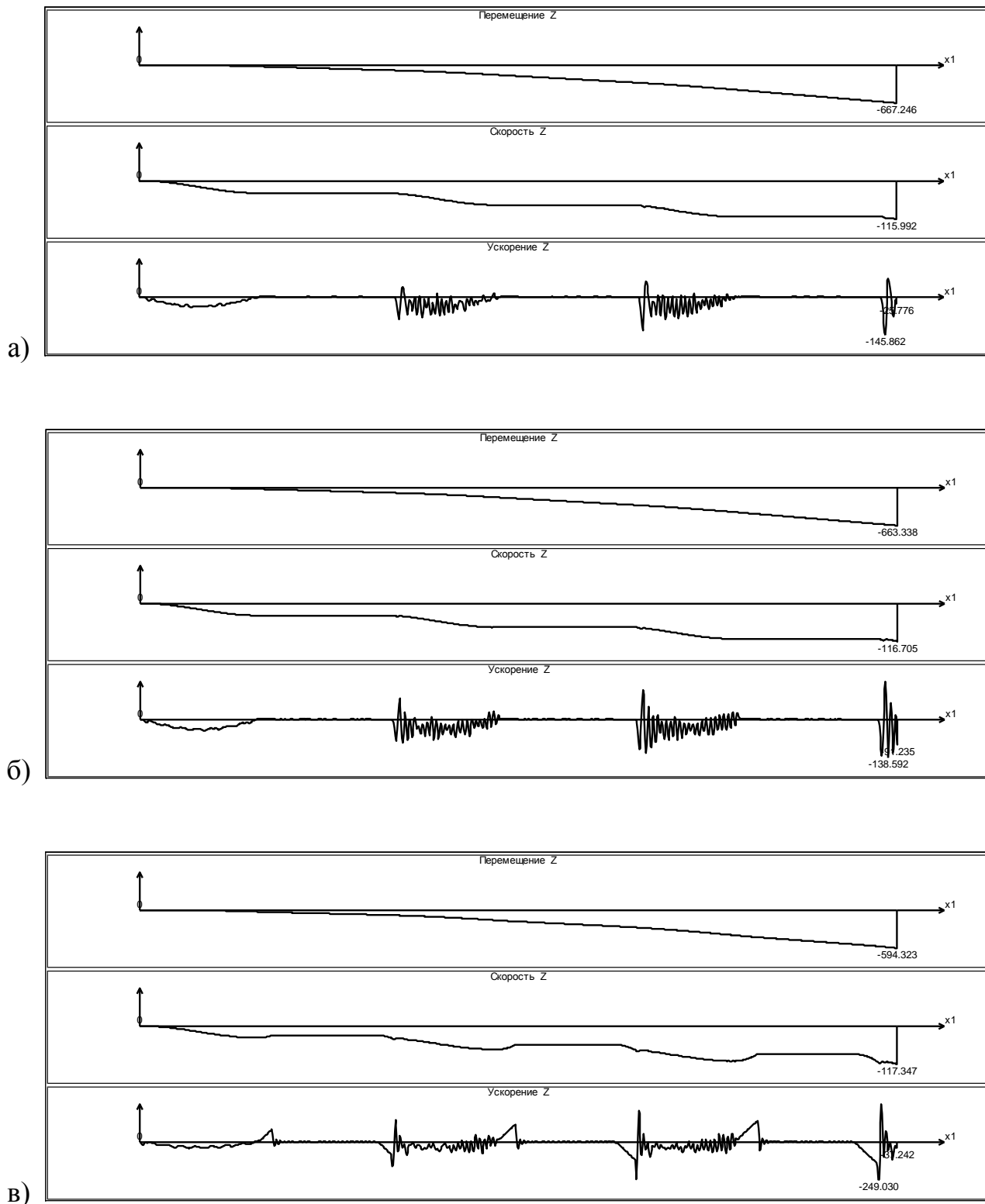


Рис. 3 – Виброграммы амплитуд вертикальных перемещений, скоростей и ускорений контактных элементов здания при расстоянии до источника динамического возмущения на поверхности грунта в интервале 30 с: а) в точке приложения динамического возмущения; б) на расстоянии 1,0 м; в) на расстоянии 2,0 м

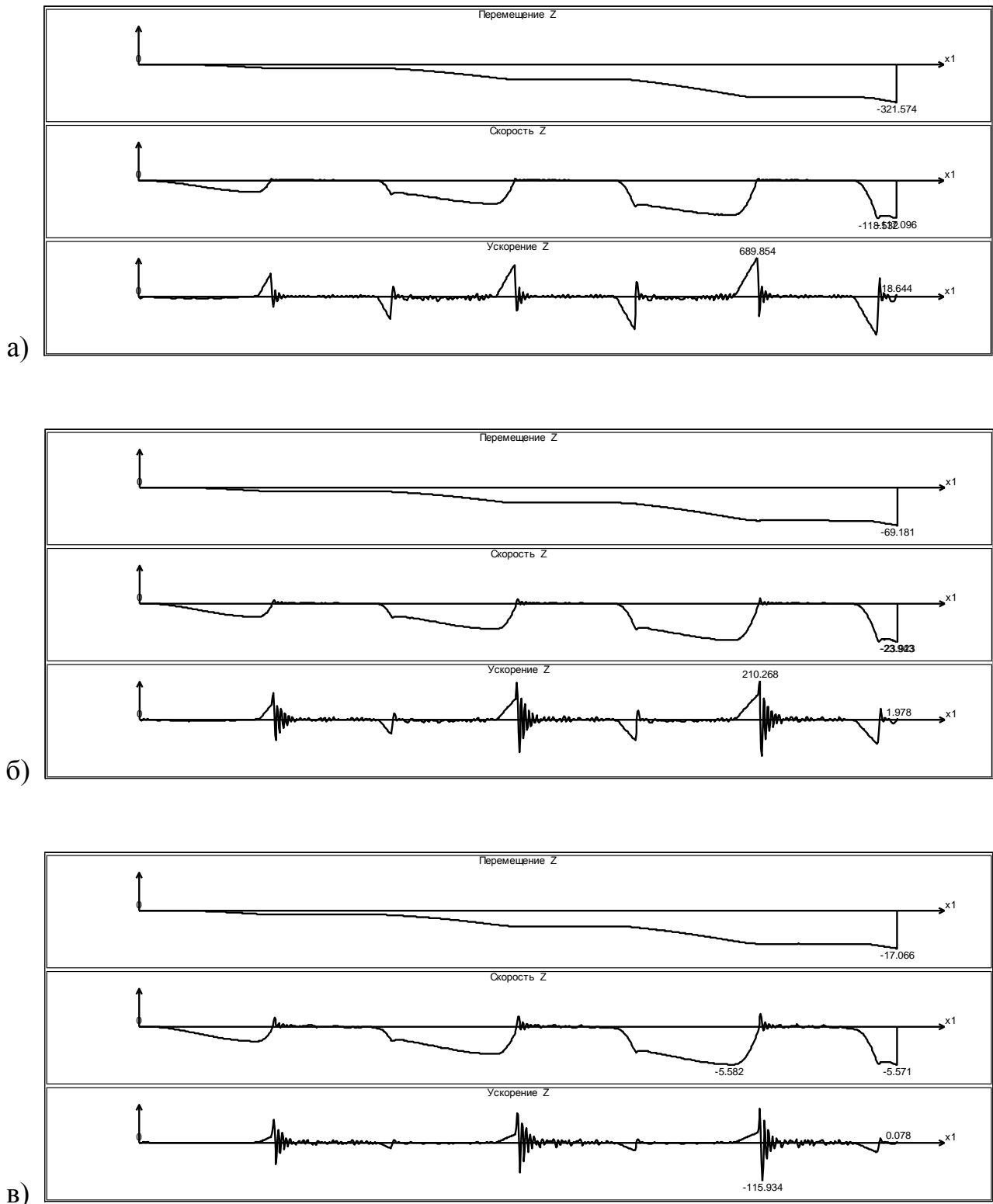


Рис. 4 – Виброграммы амплитуд вертикальных перемещений, скоростей и ускорений контактных элементов здания при расстоянии до источника динамического возмущения на поверхности грунта в интервале 30 с: а) на расстоянии 7 м; б) на расстоянии 30 м; в) на расстоянии 60 м

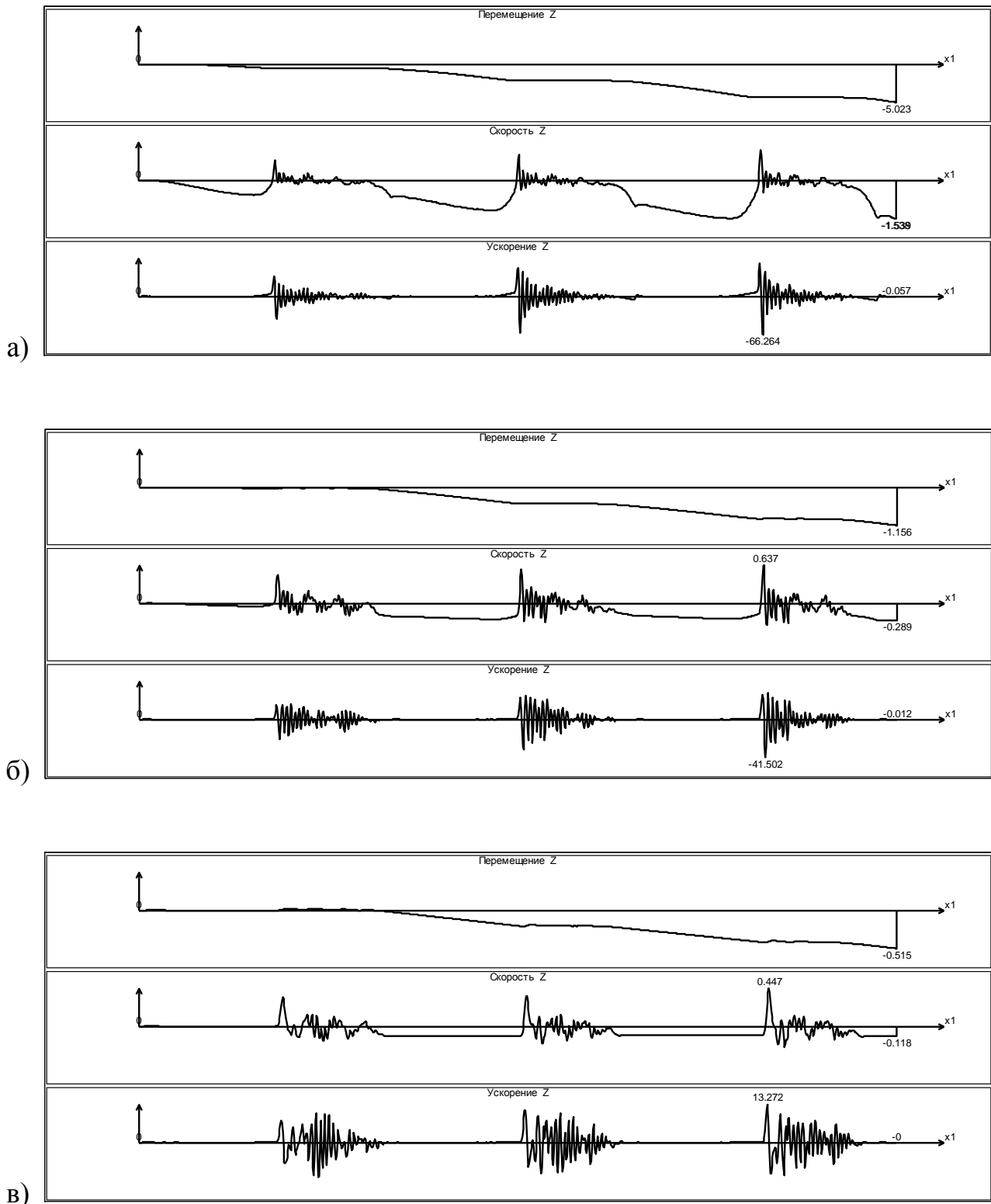


Рис. 5 – Виброграммы амплитуд вертикальных перемещений, скоростей и ускорений контактных элементов здания при расстоянии до источника динамического возмущения на поверхности грунта в интервале 30 с: а) на расстоянии 80 м; б) на расстоянии 100 м; в) на расстоянии 150 м

По результатам расчетов построены графики зависимостей коэффициентов к значениям амплитуд (в %) от приведенного расстояния r / r_0

для различных типов грунтовых условий, состава грунтов оснований и частоты колебаний. В качестве частотного диапазона исследовалась полоса 2...25 Гц как наиболее распространенная. Графики представлены на рис. 6–8.

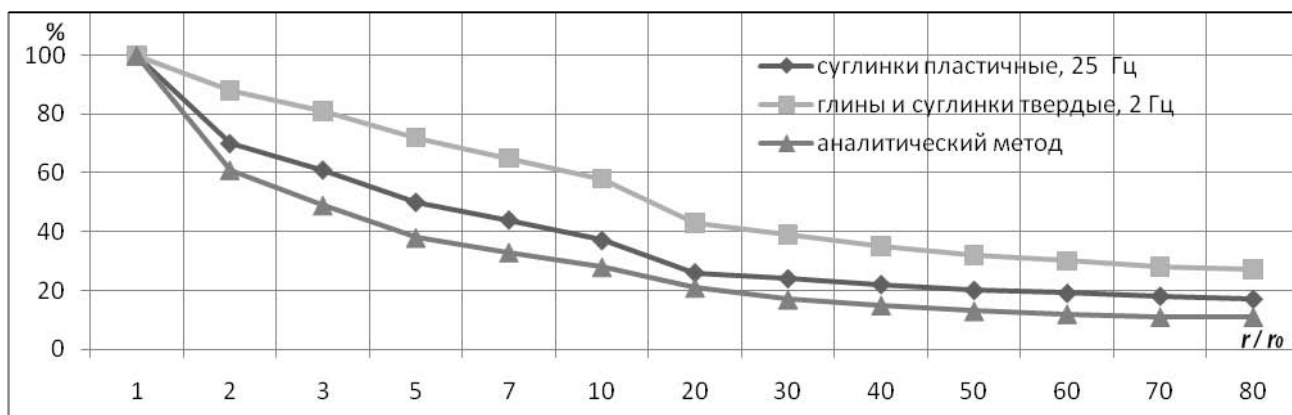


Рис. 6 – Зависимость коэффициентов к амплитудам перемещений контактных элементов здания (в %) от приведенного расстояния для глин и суглинков при вертикальном воздействии

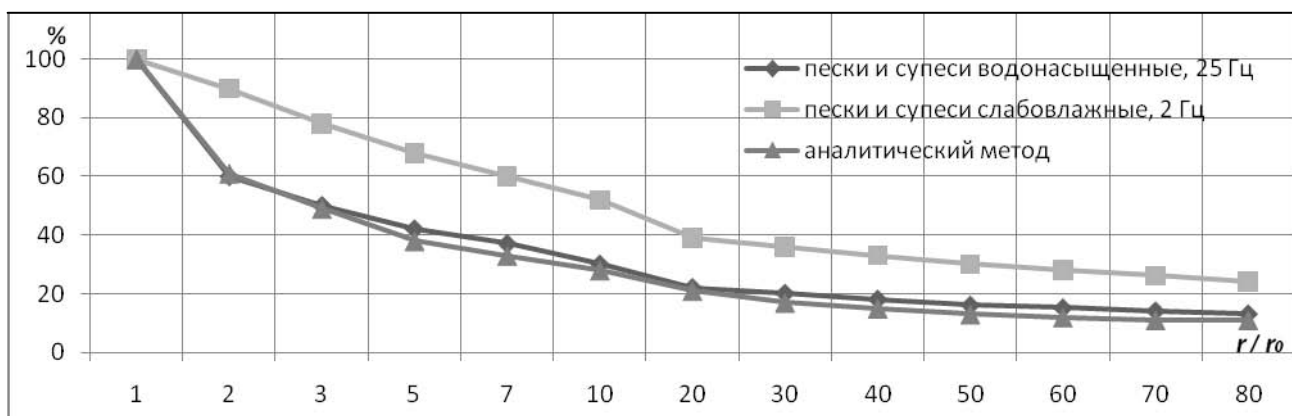


Рис. 7 – Зависимость коэффициентов к амплитудам перемещений контактных элементов здания (в %) от приведенного расстояния для песков и супесей при вертикальном воздействии

На графиках (рис. 6–8) показаны крайние положения кривых зависимостей для различных видов грунтов в состоянии естественной влажности и водонасыщенном состоянии при частотах колебаний источника на поверхности грунта 2 и 25 Гц. Графики, построенные для остальных исследованных частот 5, 10 и 15 Гц, вполне очевидно укладываются между этими крайними кривыми.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы. Метод моделирования массива грунта как основания зданий и сооружений пространственными комплектами статико-динамической (инерционной и

упруго-диссипативной) модели (см. рис. 1, б; 2) в динамических задачах позволяет наиболее точно учесть структуру и физико-механические характеристики грунтов, односторонний характер связей между элементами, смоделировать процессы, происходящие в основаниях и определить для каждого вида грунтовых условий зависимость уменьшения амплитуд колебаний от расстояния до источника динамических воздействий.

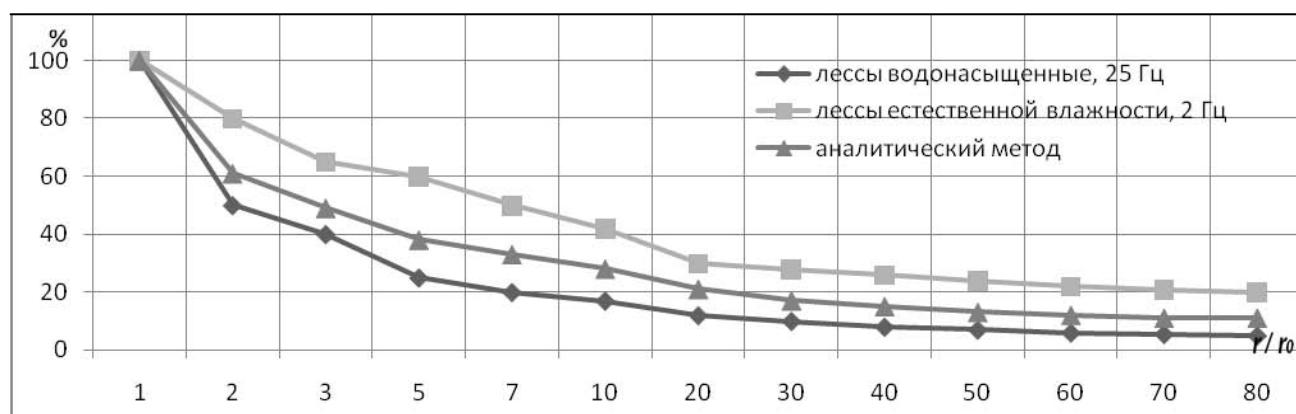


Рис. 8 – Зависимость коэффициентов к амплитудам перемещений контактных элементов здания (в %) от приведенного расстояния для лессовых просадочных грунтов при вертикальном воздействии

Последнее обстоятельство позволяет для динамических задач осуществить переход от модели взаимодействия зданий и сооружений с основаниями, моделируемыми пространственными конечными элементами или предложенными комплектами, к модели основания специальными конечными элементами и приложением динамических воздействий непосредственно к узлам контакта здания с основанием. Амплитуды этих колебаний могут определяться в зависимости от грунтовых условий по аналогичным рис. 6–8 графикам, а частоты в соответствии с общепринятой методикой принимаются равными частотам источника колебаний. Такой подход позволяет в задачах расчета таких сложных многокомпонентных систем, как «здание (сооружение) – грунтовое основание» уйти от проблемы назначения различных логарифмических декрементов колебаний, что на данный момент не реализовано в рамках использования стандартных профессиональных программных комплексов.

Основными преимуществами использования статико-динамической (инерционной и упруго-диссипативной) модели основания, представленной пространственными комплектами, являются:

– возможность проведения расчета одновременно всего сложного комплекса одного или нескольких взаимодействующих через грунт зданий и сооружений при комплексных динамических воздействиях;

– возможность моделирования различных задач механики грунтов, разрыва связей между элементами оснований и между грунтовыми основаниями и конструкциями;

– учет неоднородности грунта по глубине и по слоям, уклона слоев и склонов, дискретных свайных, скальных и других включений, и т.п.;

– возможность задания любых законов увеличения модуля деформации грунта с ростом глубины сжимаемых слоев (линейного, параболического и т.д., в зависимости от конкретных инженерно-геологических условий);

– возможность моделирования необходимых сочетаний параметров диагональных, вертикальных и горизонтальных связей, которые приводят к распределительной способности моделируемого основания в соответствии с экспериментальными данными;

– возможность корректного моделирования нелинейных фрикционных соединений (стыков конструкций), а также изменения свойств среды, зависящих от времени, нагрузки, режима вибрации и т.д.

Выводы. Таким образом, для моделирования взаимодействия системы «здание (сооружение) – основание» при динамических воздействиях может быть рекомендован предложенный подход, основанный на формировании статико-динамической (инерционной и упруго-диссипативной) модели грунтового основания пространственными комплектами. Это дает возможность выполнения корректных динамических расчетов сложных систем, моделирования любой структуры и состава оснований, выявления закономерностей распространения колебаний в грунте и на его поверхности, а также упрощения расчетных моделей такого взаимодействия.

Литература

1. Городецкий А. С. Компьютерные модели конструкций / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров. – К.: Издательство «Факт», 2005. – 344 с.
2. Дыховичный А. А. Модели строительных конструкций и их идентификация : дис. ... доктора техн. наук : 05.23.01 / Дыховичный Александр Александрович. – К., 1995. – 322 с.
3. Перельмутер А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – М.: Издательство ДМК Пресс, 2007. – 595 с.
4. Кулябко В. В. Динамика конструкций, зданий и сооружений. Ч. 1 : Статико-динамические модели для анализа свободных колебаний и взаимодействия сооружений с основаниями и подвижными нагрузками / В. В. Кулябко. – Запорожье: ЗГИА, 2005. – 232 с.
5. Моргун А. С. Моделювання ефекту взаємодії системи «будівля –

фундамент – основа» числовим методом граничних елементів : монографія / А. С. Моргун, І. М. Меть, А. В. Ніцевич. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 132 с.

6. Криворотов А. П. Оценка взаимодействия фундаментов с грунтом и совершенствование методов их проектирования : дис. ... доктора техн. наук : 05.23.02 / Криворотов Александр Петрович. – Пермь, 2002. – 404 с.

7. Чухлатый М. С. Численное исследование напряженно-деформированного состояния системы «здание-фундамент-грунт» : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18, 01.02.04 / Чухлатый Максим Сергеевич. – Тюмень, 2004. – 107 с.

8. Основания, фундаменты и подземные сооружения : справочник проектировщика / [М. И. Горбунов-Посадов, В. А. Ильичев, В. И. Крутов и др.] ; под ред. Е. А. Сорочана, Ю. Г. Трофименкова. – М. : Стройиздат, 1985. – 480 с.

Анотація

Наведені результати досліджень динамічних навантажень, розташованих за межами будівельних об'єктів, і механізмів їхньої передачі через ґрунтові основи. Запропонована модель ґрунтової основи для врахування її взаємодії з будівлями і спорудами для аналізу напружено-деформованого стану їхніх конструкцій.

Ключові слова: динамічні дії, будівлі і споруди, ґрунтові основи, розрахункові моделі, напружено-деформований стан, складні інженерно-геологічні умови

Annotation

Results of researches of dynamic influences located outside building objects and mechanisms of their transmission through the soil grounds are brought. The model of the ground foundation for the account of his co-operation with buildings and structures for the analysis of the tensely-deformed state of their constructions is offered.

Keywords: dynamic influences, building and structures, soil grounds, calculation models, stress-strain state, difficult engineer-geological conditions