

DOI: 10.12737/article_5bd95a744377e9.98556143

^{1,*}Синельщиков А.В., ²Панасенко Н.Н.¹Астраханский государственный архитектурно-строительный университет

Россия, 414056, Астрахань, ул. Татищева, д. 18

²Астраханский государственный технический университет

Россия, 414056, Астрахань, ул. Татищева, д. 16

*E-mail: laex@bk.ru

ОБОСНОВАНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ С УЧЁТОМ ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Аннотация. Предложена методика расчета на сейсмостойкость комплексной системы промышленного здания со встроенным технологическим оборудованием и грузоподъемными кранами совместно с грунтовым основанием. Промышленный объект рассматривается с позиций системного подхода как первично-вторичная система. В отличие от традиционного подхода моделирования сейсмического воздействия в виде акселерограммы (записи ускорения на поверхности грунта), в работе предлагается использовать волновую модель сейсмического воздействия в виде перемещений (сейсмограммы) границ грунтового основания, включенного в состав расчетно-динамической модели, с учетом задержки прихода объемной сейсмической волны. Грунтовое основание рассматривается как первичная система, воспринимающая сейсмическое воздействие, и передающая его на здания и технологическое оборудование. Расчетная сейсмограмма получена с учетом действительных грунтовых условий и сейсмологических характеристик на строительной площадке. Предлагаемый подход позволяет подвергать исследованию всех подсистем комплекса зданий, с учётом их взаимовлияния друг на друга. Без дополнительных упрощений возможен учёт вращательных компонент реакции зданий при прохождении сейсмической волны, а также расчётный анализ сейсмической безопасности по режиму столкновений и возможных соударений стен отдельных блоков и корпусов.

Ключевые слова: метод динамического анализа, линейно-спектральный метод, сейсмическое воздействие, метод конечных элементов, сейсмостойкость зданий и сооружений, волновые свойства сейсмического воздействия

Введение. Непредсказуемость землетрясений как по времени возникновения, так и по интенсивности, привело к созданию дорогостоящих и материалоемких сооружений. Особые требования сейсмической безопасности предъявляются к объектам с повышенной экономической и социальной ответственностью, к числу которых относятся как непосредственно здания, так и технологическое оборудование, и машины, размещённые в зданиях и обеспечивающие работу с опасными грузами и веществами.

В настоящее время в расчетной практике в равной степени используются два метода обоснования сейсмостойкости – статический и динамический. Очевидно, что в силу специфики сейсмического воздействия (СВ) как временного процесса наиболее корректным является использование динамической теории сейсмостойкости (или метода динамического анализа (МДА)). Однако в настоящее время использование динамических методов обоснования сейсмостойкости является обязательным только для сооружений с повышенной ответственностью, например, объектов использования атомной энергии [1, 2]. В свою очередь для гражданских сооружений и общепромышленных предприятий используется СП 14.13330 [3] и линейно-спектральный метод

(ЛСМ) теории сейсмостойкости, который несмотря на учёт динамических характеристик СВ и сооружения, по сути, является статическим методом. Недостатки ЛСМ неоднократно критиковались как на уровне самого метода, так и модели СВ в виде сейсмических спектров ответа (ССО) [4–6].

Методология. Одно из главных отличий динамического расчёта сооружений с учётом ускорений движения их распределённых и сосредоточенных масс от статического заключается в учете инерционной нагрузки, зависящей от интенсивности СВ, а также реакция сооружения в виде перемещений, скоростей и ускорений как временной процесс при прохождении землетрясения. Формулировка МДА применительно к задаче обоснования сейсмостойкости инженерных сооружений и установленного в них технологического оборудования в общем виде записывается как матричное дифференциальное нелинейное уравнение движения в n степенях свободы [4–6]:

$$[M]\{\ddot{V}\} + [C]\{\dot{V}\} + [K]\{V\} + \{R(V, \dot{V})\} = \{P\} \quad (1)$$

где $\{V\}$, $\{\dot{V}\}$, $\{\ddot{V}\}$ – вектора обобщённых перемещений, скоростей и ускорений системы, соответственно; $[M]$, $[K]$ и $[C]$ – матрицы масс, жёсткости и диссипации, соответственно, полной системы

порядка $n \times n$; $\{R(V, \dot{V})\}$ – вектор сил, обусловленный нелинейными характеристиками системы; $\{P\} = \{P_{ст}\} + \{P_{дин}(t)\}$ – вектор, содержащий внешние статические и динамические нагрузки на систему. Традиционным методом аппроксимации сооружений и технологического оборудования является метод конечных элементов с использованием стержневых, пластинчатых (оболочечных) и объемных конечных элементов (КЭ) [4–6].

Для практических расчётов уравнение (1), как правило, упрощается. В расчётах не учитываются отдельные, и иногда очень существенные, нелинейные характеристики системы, например, такие как включающиеся связи (зазоры), сухое трение и др., т.е. $\{R(V, \dot{V})\} = 0$. Матрицы $[M]$, $[K]$ и $[C]$ считаются константами на протяжении всего сейсмического воздействия и, таким образом, не учитывают, например, односторонние упругие связи или пластические деформации в материале конструкций. Более того, до настоящего времени дискуссионным является учёт диссипативных характеристик системы $[C]$. Конкурирующими являются гипотезы определения параметров рассеивания энергии колебаний – гипотеза Фойгта, гистерезисная теория затухания Е. С. Сорокина, соотношение Релея, матрица затухания с частотно-независимым внутренним трением А. И. Цейтлина, матрица затухания В.Т. Рассказовского и А.И. Мартемьянова, и др. Обзор и сравнительный анализ диссипативных моделей приведен в [5, 6].

Исключительно важным представляется вопрос моделирования входного СВ, определяющего динамическую составляющую воздействия $\{P_{дин}(t)\}$ в (1). Традиционно, входное сейсмическое воздействие в МДА моделируется записью ускорений движения точки поверхности земли на строительной площадке – трехкомпонентной (x, y, z) акселерограммой землетрясения. Сложность заключается в том, что заранее неизвестно, какими динамическими и частотными характеристиками будет обладать СВ. Это привело к созданию обобщенных моделей СВ как в виде обобщенных ССО (например, в [3, 7]) и синтезированных акселерограмм [8, 9], так и построенных с использованием теории вероятности и математической статистики [10]. Для машин и технологического оборудования проектировщику также приходится вычислять поэтажные ССО и поэтажные акселерограммы, соответствующие уровню установки оборудования, так как здание выступает в роли фильтра, преобразующего входное СВ в зависимости от собственных жестких, массовых и диссипативных характеристик. Первичной информацией о землетрясении

(и воздействием) являются оцифровки ускорений, скоростей и перемещений точки поверхности земли. Все вторичные модели СВ (поэтажные модели СВ и ССО) являются расчетными и зависят от качества построенных расчетных схем, использованных методов обработки исходного воздействия и квалификации расчетчика. Кроме этого, вторичные модели СВ зачастую огрубляются, так для ССО используется частотный диапазон до 30–50 Гц.

Во всех указанных моделях входного воздействия, СВ имеет смысл инерционной нагрузки и считается одинаковой (для СВ в виде ускорения) в каждый момент времени для всех точек здания и технологического оборудования. В тоже время СВ является волной, распространяющейся с ограниченной скоростью в грунте. Для протяженных сооружений, сейсмическая волна, многократно отражаясь и преломляясь, искажаясь на границе грунтовых слоев, взаимодействуя с фундаментным основанием в один и тот же момент времени оказывает различное воздействие вдоль фундамента здания. В настоящей работе рассматриваются вопросы обоснования сейсмостойкости зданий и установленного в нем технологического оборудования с учётом волновых свойств СВ, распространяющегося в грунтовом основании вдоль здания. Наиболее существенным оказывается влияние волновых свойств СВ для протяженных зданий, длина которых соизмерима с длиной сейсмической волны.

В отличие от обычных инженерных сооружений протяжённые здания помимо поступательного движения получают и вращательное и при прохождении землетрясения возможен их изгиб [11], что, как правило, не учитывается при проектировании. Кроме этого, вращательные компоненты воздействия не учитываются при проектировании технологического оборудования здания. В связи с этим динамический анализ должен производиться с позиций системного подхода, с учётом всех факторов, влияющих на сейсмостойкость.

При системном подходе сооружение рассматривается как множество взаимосвязанных первично-вторичных строительных и технологических объектов разной природы, обусловленных самим сооружением и множеством существующих внутри первичного объекта – вторичных объектов, а также внешней средой (грунтовым основанием), оказывающих воздействие на первичную систему здания. Таким образом, с точки зрения обоснования сейсмостойкости сооружение необходимо рассматривать как набор объектов, объединённых в единую структуру связями отражающих их взаимодействие. В общем случае реальное сооружение, как система, –

это грунтовое основание, промышленное здание, в котором расположены машины и технологическое оборудование (рис. 1).

Первичной системой, воспринимающей СВ, является грунтовое основание. Вторичной системой, воспринимающей воздействие от первичной – промышленное здание и находящееся в нем технологическое оборудование. В рамках системного подхода каждую из указанных подсистем можно разбить на свои подсистемы. Оче-

видно, что СВ заданное акселерограммой, не удовлетворяет условию передачи воздействия от одной подсистемы к другой с учётом искажения при прохождении воздействия через каждую подсистему. В этом случае в расчётно-динамическую модель (РДМ) сооружения должны быть включены, помимо самого здания и находящегося в нем технологического оборудования, фундамент, свайное поле (при наличии) и грунтовое основание как среда распространения сейсмической волны (рис. 2).

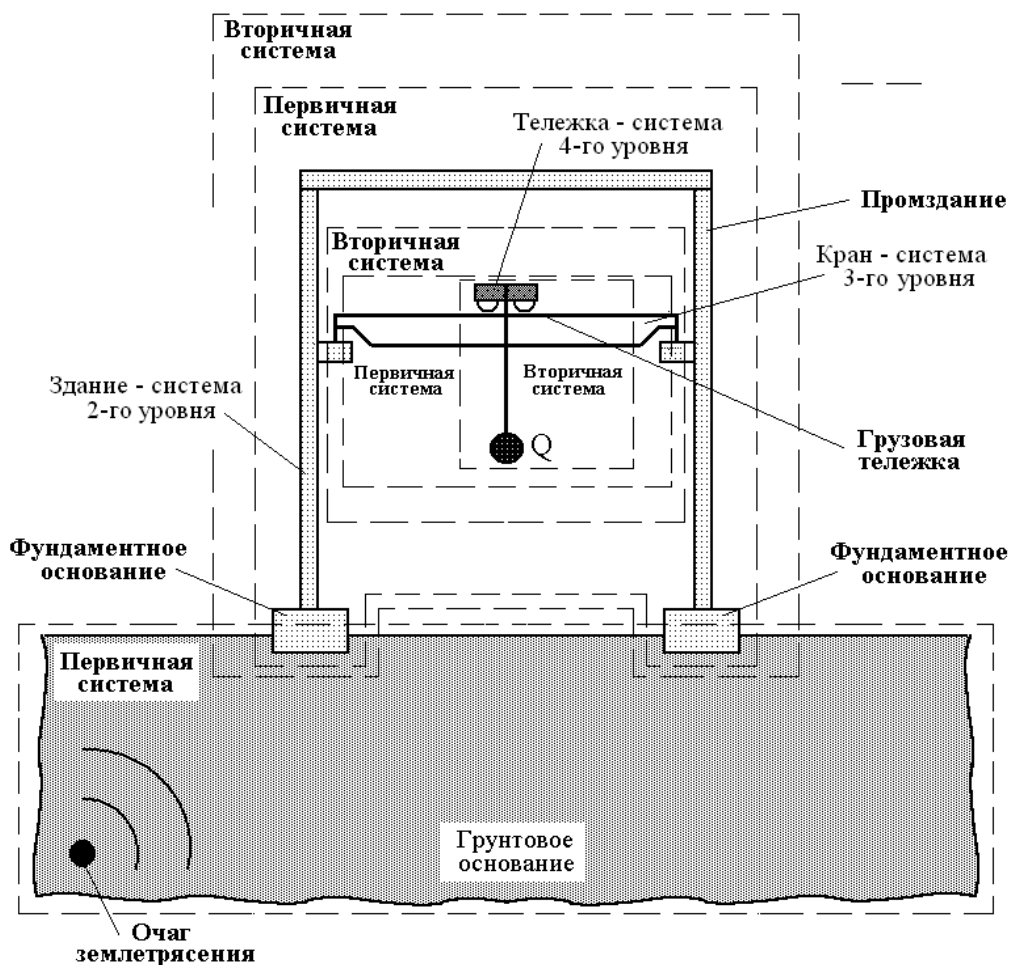


Рис. 1. Первично-вторичная система сооружения

По сравнению с акселерограммой, волновая модель СВ является более общей и учитывает конкретные сейсмические условия на строительной площадке. Кроме этого, в отличие от инерционного воздействия, определяемого акселерограммой, волновая модель позволяет учитывать задержку прихода воздействия по направлению распространения сейсмической волны как в грунте, так и в сооружении.

Исходными данными для использования волновой модели СВ является сведения об очаге землетрясения, его удаленность от строительной площадки и грунтовые условия геологического разреза. Использование математической модели распространения сейсмической волны позволяет

строить как максимально возможное (по магнитуде), так и наиболее вероятное сейсмическое воздействие на здания и сооружения.

Несмотря на исходный волновой характер СВ, как волновой процесс землетрясение рассматривается исключительно в сейсмологии. Практика применения волновых моделей при расчете инженерных сооружений отсутствует. Как правило, построение волновой модели СВ осуществляется на основе результатов сейсмомикрорайонирования строительной площадки с использованием двух моделей – модели сейсмического источника землетрясения и модели сейсмического эффекта, основанного на повторяемости землетрясений в рассматриваемом

регионе, определяющих пространственное и временное распределение сейсмичности. Обзор математических моделей распространения сейсмических волн от эпицентра землетрясения к поверхности земли приведен в [6].

Результатом моделирования распространения сейсмических волн от эпицентра к поверхности земли являются сейсмограммы, велосиграны и акселерограммы движения точек земли

на поверхности и на любой заданной глубине. При этом волновое сейсмическое воздействие задается сейсмограммой – законом движения границы грунтового основания РДМ сооружения (рис. 3) с учётом скорости распространения сейсмической волны, зависящей от типа грунта (табл. 1) [12].

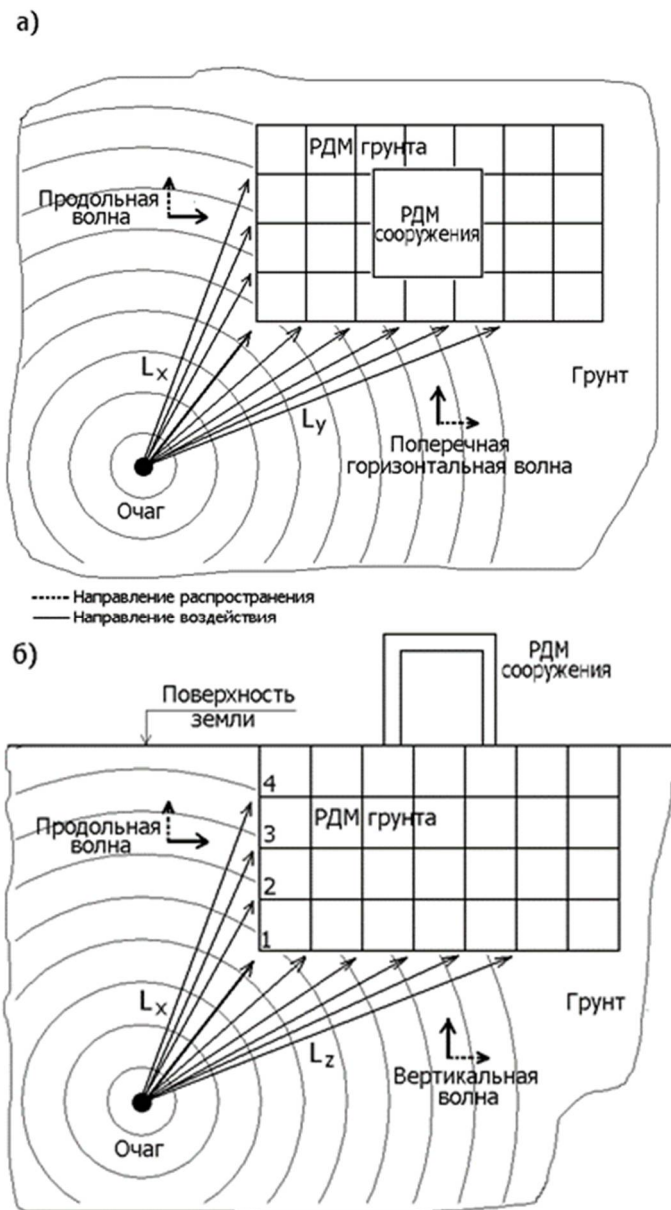


Рис. 2. Схема воздействия волнового СВ на РДМ сооружения: а – вид сверху; б – вид сбоку

Таблица 1

Скорость распространения поверхностных сейсмических волн

Тип грунтов	Скорость распространения поверхностных волн, м/с
Скальные	1000–3000
Полускальные	1000–1500
Крупнообломочные	800–1200
Песчаные и глинистые	400–800
Насыпные и почвенные	100–300
Обводненные	100–1000

Задержка прихода сейсмической волны к каждой граничной точке грунтового основания РДМ может быть вычислена в зависимости от скорости поверхностных сейсмических волн (продольных V_p и поперечных V_s). В работе [13] предлагается соотношения, определяющие зависимость скорости распространения сейсмических волн от характеристик грунта: плотности

грунта ρ , модуля всестороннего сжатия λ и модуля сдвига μ грунта

$$\begin{aligned} V_p &= \sqrt{(\lambda + 1.33\mu)/\rho}; \\ V_s &= \sqrt{\mu/\rho}, \end{aligned} \quad (2)$$

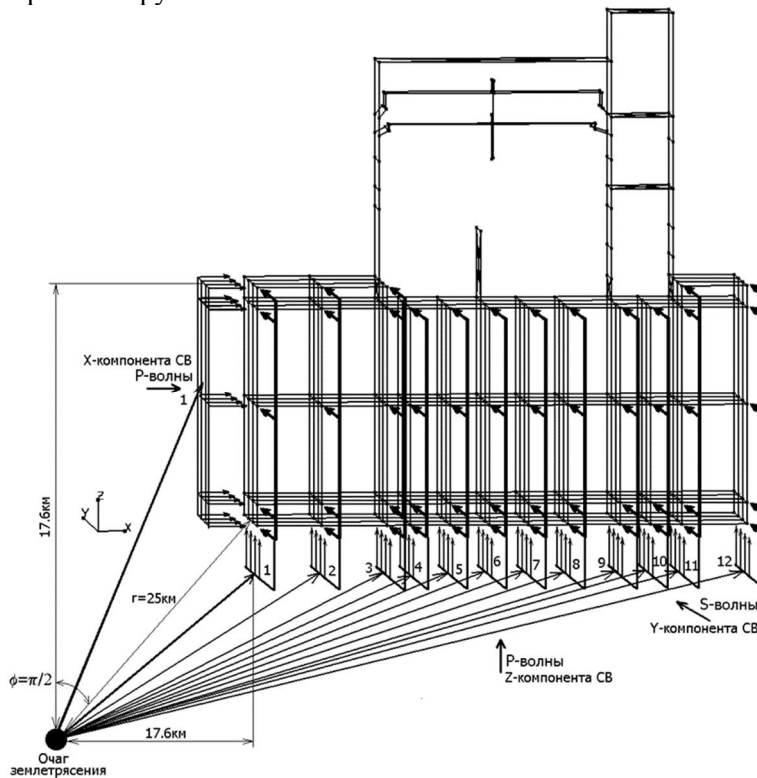


Рис. 3. Схема приложения волнового СВ в виде сейсмограммы на границы РДМ «грунт-здание-технологическое оборудование»

Основная часть. Предложенная методика использовалась авторами для анализа сейсмической безопасности комплекса промышленных зданий со встроенным технологическим оборудованием и грузоподъемными кранами. Первичная система грунта (рис. 4) состоит из пяти инженерно-геологических слоев (ИГС). РДМ грунтового основания площадки строительства представлена грунтовым массивом размером 490×490 метров с подошвой на отметке $+240$ м. РДМ грунтового основания площадки строительства состоит из 256552 объемных КЭ грунтового основания, в том числе 46179 - ИГС I, 9404 - ИГС II, 102223 - ИГС III, 49209 - ИГС IV, 49537 - ИГС V. Основной шаг конечно-элементной сетки 5×5 метров с ее сгущением в месте ростверков и свайного поля зданий в зависимости от шага свайного поля. Общее количество узлов 310393, количество степеней свободы $n=1\ 862\ 358$.

Промышленное здание располагается на свайном ростверке и показано отдельно от общей РДМ на рис. 5. В сборе, РДМ комплекса «грунт-

здание-технологическое оборудование» на свайном поле и грунтовом основании состоит из 456098 КЭ, в том числе 80865 стержневых КЭ, 106653 оболочечных КЭ, 268580 объемных КЭ. Общее количество узлов 414064, количество степеней свободы $n=2\ 484\ 384$ (рис. 6).

Внутри РДМ зданий, на соответствующих высотных отметках, размещено технологическое оборудование и грузоподъемные краны, один из которых показан на рис. 7.

Расчет сейсмического воздействия производился с помощью метода сейсмических жесткостей и вычислительной программы, рассчитывающей параметры колебаний поверхности грунтовой толщи, в частности, на основе линейных уравнений [14] методом передаточных функций по программе WinShake (модификация SHAKE 91 [15]). Моделированием реакции геологической среды на землетрясение определена реакция грунта на сейсмическое воздействие для уровня 7 баллов MSK-64 в виде акселерограмм, велосигрограмм и сейсмограмм. На рис. 8 приведены гра-

фики эффективной фазы 3-х компонентных сейсмограмм 7 баллов MSK-64 на отм. +240 м площадки строительства зданий.

Интегрирование уравнения движения (1) общей РДМ «грунт-здание-технологическое оборудование» (см. рис. 6) на волновое СВ заданное

сейсмограммой на границах грунтового основания (см. рис. 8) осуществлялось с использованием метода Гилбера-Хьюза-Тейлора [16], по результатам которого получена реакция узлов общей РДМ в виде перемещений, скоростей и ускорений (рис. 9).

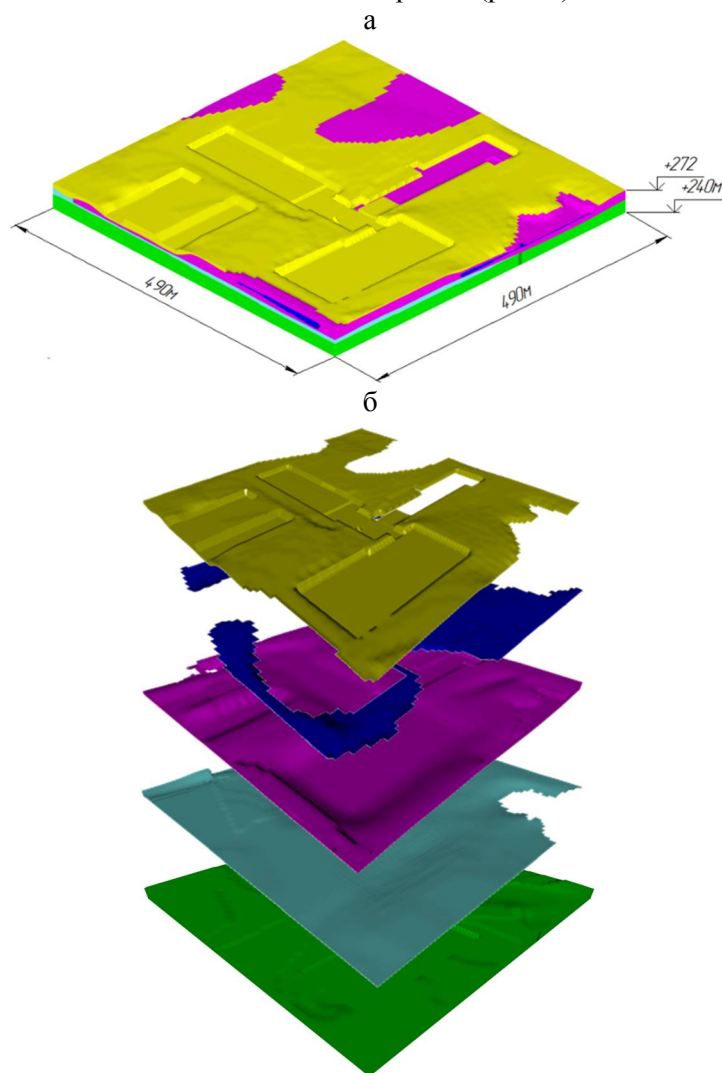


Рис. 4. РДМ грунтового основания как первичной системы РДМ «грунт-здание-технологическое оборудование»: а – общий вид РДМ; б - инженерно-геологические слои РДМ грунтового основания

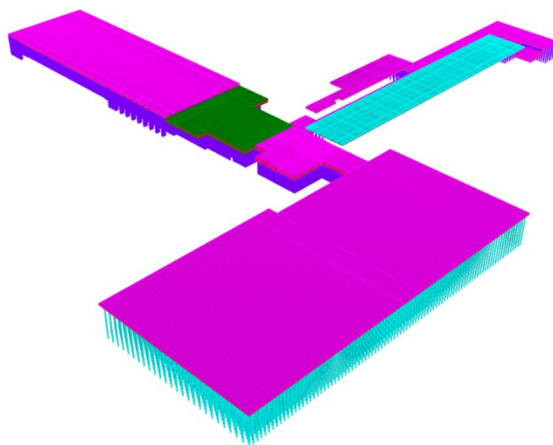


Рис. 5. РДМ ростверка и свайного поля РДМ «грунт-здание-технологическое оборудование», расположенного внутри грунтового основания

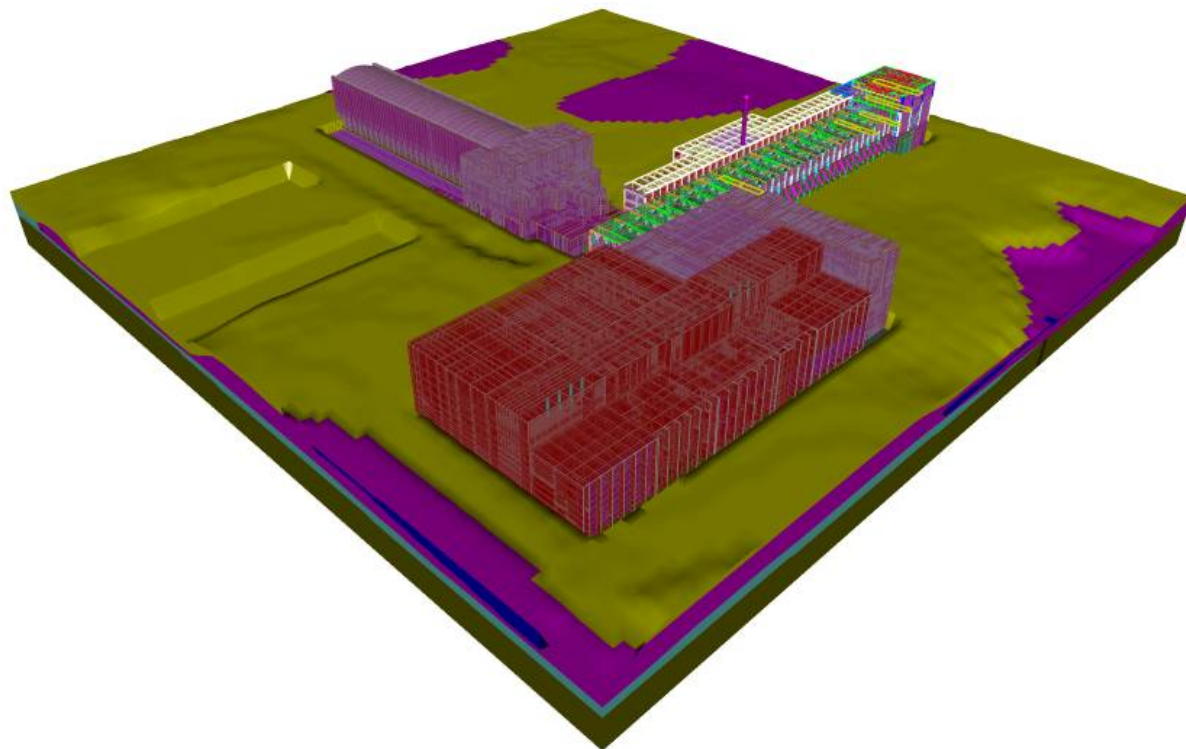


Рис. 6. РДМ «грунт-здание-технологическое оборудование»

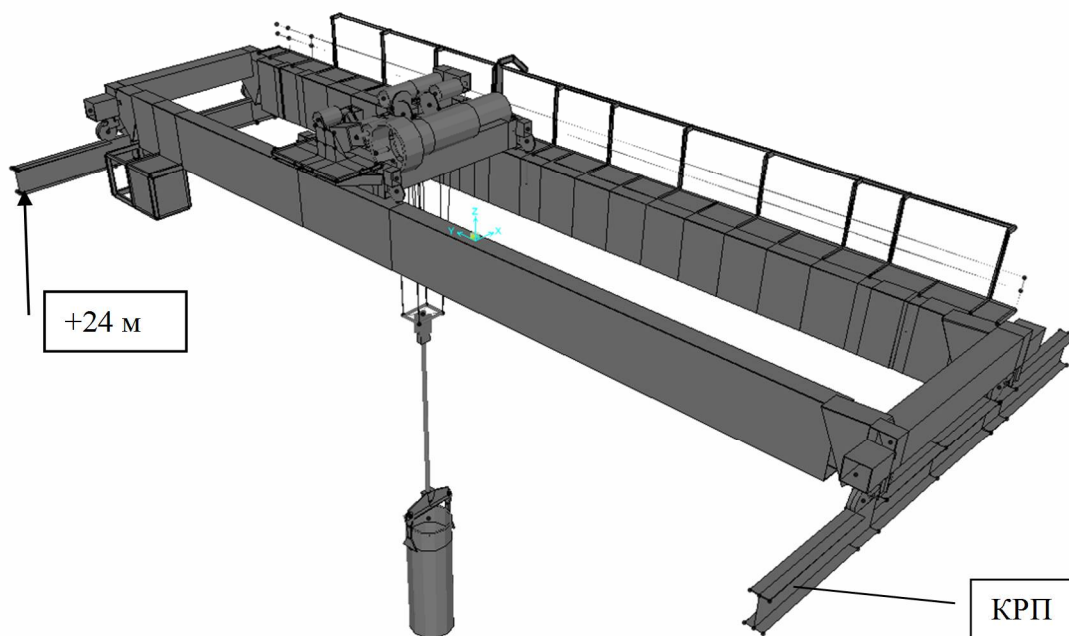
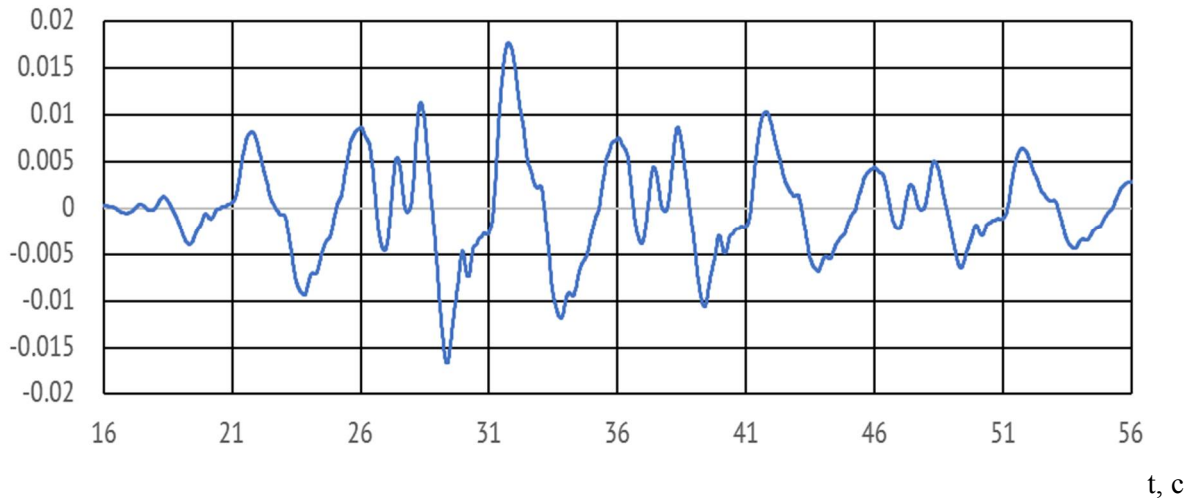
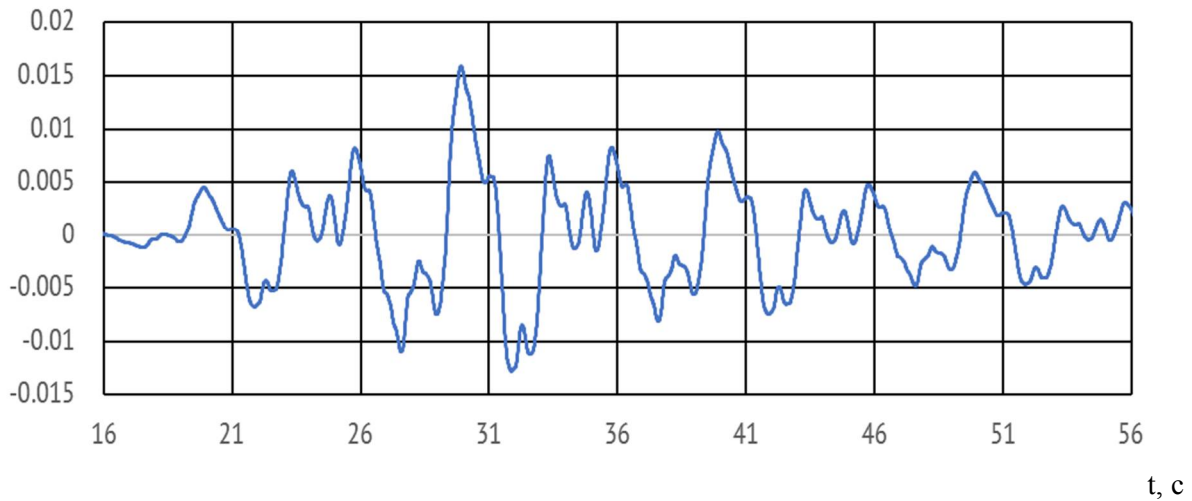


Рис. 7. РДМ мостового крана грузоподъемностью 130 тонн на отметке +24 м с полезным грузом $Q_{ном}=130$ т: число узлов – 1755, число стержневых элементов – 840, число пластинчатых элементов – 1168, число степеней свободы – 10423

Перемещение X, м



Перемещение Y, м



Перемещение Z, м

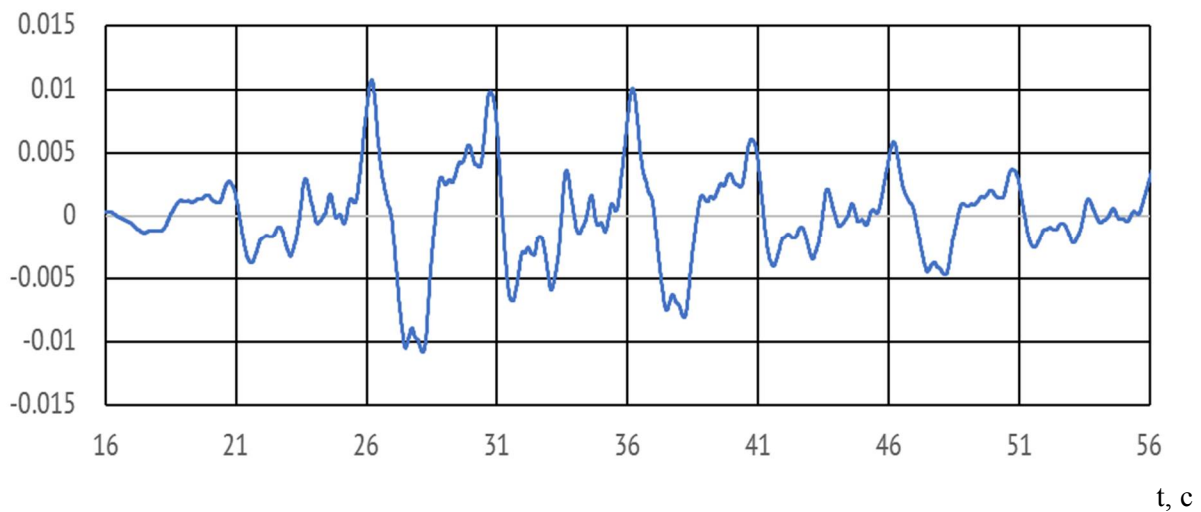


Рис. 8. Эффективная фаза исходной 3-х компонентной сейсмограммы 7,0 баллов MSK-64 на отг. +240 м площадки строительства

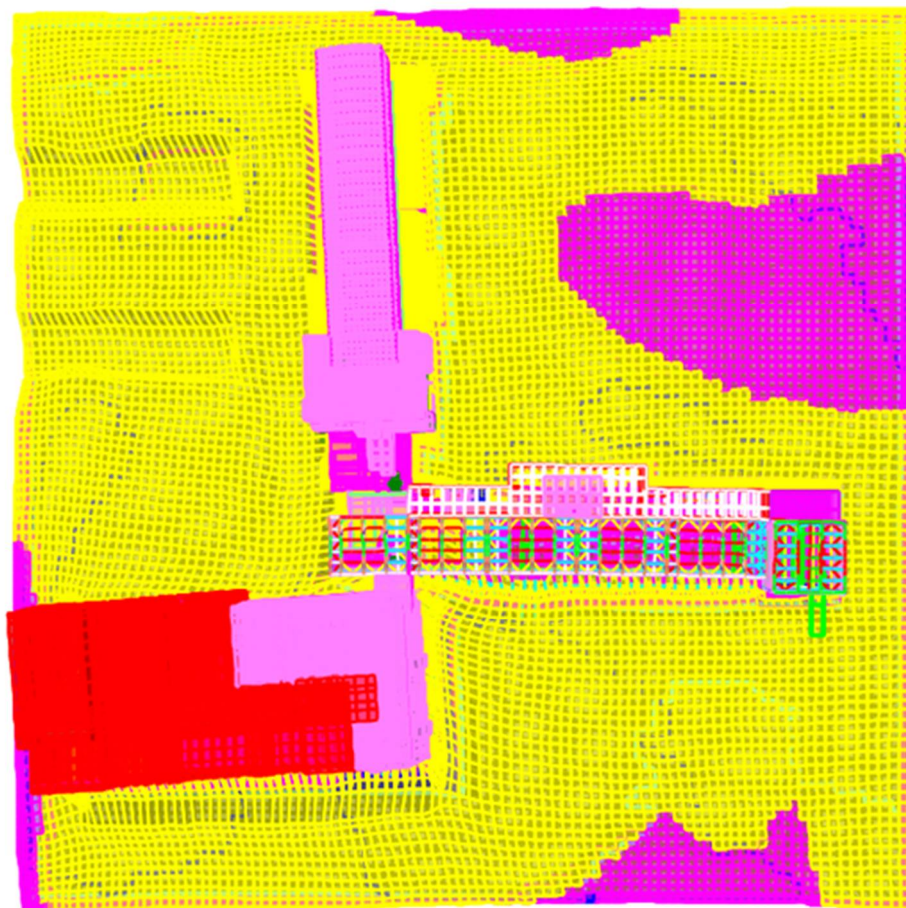


Рис. 9. Реакция (перемещение) узлов РДМ «грунт-здание-технологическое оборудование» в момент времени $t=19$ с при прохождении волнового СВ 7 баллов по шкале MSK-64, вид сверху, увеличено в 500 раз

Выводы. В заключении укажем, что по мнению авторов, наиболее перспективным и точным способом формирования модели сейсмического воздействия является представление его как волны, распространяющейся в земной коре. Такой подход позволяет описать сейсмическое воздействие с учётом всех физических особенностей грунта, а также учесть эффекты отражения и преломления сейсмических волн.

Учёт волновых свойств сейсмического воздействия оказался возможным только при применении системного подхода в вопросах расчётного обоснования сейсмостойкости сооружений, связанного с включением в единую взаимосвязанную конечно-элементную модель подсистемы грунтового основания, как среды распространения сейсмической волны. При этом моделирование сейсмического воздействия, как волнового процесса, позволяет сделать ряд замечаний:

1. Теоретической сейсмологией накоплен значительный опыт по моделированию распространения сейсмических волн от источника землетрясения (очага) к поверхности земли. Создано множество аналитических моделей распространения сейсмических волн, причем практически

все из них описывают область земной поверхности глубиной до нескольких километров. Для практических инженерных расчётов по обоснованию сейсмостойкости достаточно учитывать грунтовое основание в пределах поверхностного слоя земли в области, где грунтовое основание оказывает влияние на реакцию сооружения при прохождении землетрясения.

2. Вследствие ограниченности области моделируемого грунтового основания сейсмическая волна, как кинематическое воздействие, задается для границ расчётной модели грунтового основания со стороны прихода сейсмической волны и поляризовано в трех направлениях и прикладывается с задержкой в зависимости от скорости распространения сейсмической волны в грунте. Дальнейшее распространение сейсмической волны полностью определяется динамическими характеристиками РДМ грунтового основания, которые характеризуют конкретные грунтовые условия геологического разреза на строительной площадке. Подсистема грунтового основания в РДМ системы удовлетворяет общепризнанным критериям адекватности распространения сейсмических волн в грунте.

3. Сейсмическая волна в настоящей работе задана в виде распространяющейся волны в параметрах перемещений сейсмограммы.

4. Предлагаемый подход позволяет подвергать исследованию сейсмические колебания всех подсистем комплекса зданий, с учётом их взаимовлияния друг на друга. При этом, без дополнительных упрощений возможен учёт вращательных компонент реакции зданий при прохождении сейсмической волны, а также расчётный анализ сейсмической безопасности по режиму столкновений и возможных соударений стен отдельных блоков и корпусов зданий при различных амплитудных значениях совпадающих по фазе перемещений сопряжённых элементов стен отдельных корпусов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. М.: Госатомнадзор РФ, 2002. 27 с.
2. НП-043-11. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъёмных кранов для объектов использования атомной энергии // Ядерная и радиационная безопасность. 2014. №1 (71). С. 11–24.
3. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. М.: Минрегионразвития, 2014. 125 с.
4. Панасенко Н.Н., Синельщиков А.В. Линейно-спектральный метод теории сейсмостойкости подъёмных сооружений. Часть 1. Математическая модель расчётных сейсмических воздействий // Подъёмно-транспортное дело. 2017. № 4–5 (90). С. 2–7.
5. Панасенко Н.Н. Динамика и сейсмостойкость подъёмно-транспортного оборудования атомных станций. Диссерт. ... докт. техн. наук. В 2-х частях. Часть 1. Новочеркасск: НГТУ, 1992. 475 с.
6. Синельщиков А.В. Динамика и сейсмостойкость мостовых кранов: Диссерт. ... канд. техн. наук. Астрахань: АГТУ, 2000. 276 с.
7. МР 1.5.2.05.999.0025-2011. Расчёт и проектирование сейсмостойких атомных станций: методические рекомендации. М.: АОО «Концерн Росэнергоатом», 2011. 92 с.
8. РТМ 108.020.37-81 (переиздание с Изменением №1 1985 г.). Оборудование атомных энергетических установок. Расчёт на прочность при сейсмическом воздействии. Л.: НПО ЦКТИ, 1986. 35 с.
9. РБ 006 - 1998. Руководство по безопасности. Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ / Утв. пост. Госатомнадзора России от 29.12.1998, № 3.
10. Мацеля В.И., Сеелев И.Н., Скурыдина Е.С., Хафизов Р.Р., Панасенко Н.Н., Синельщиков А.В., Яковлев П.В. Вероятностно-статическая модель расчётного сейсмического воздействия на ОИАЭ г. Железнодорожск. Братск: Изд-во БрГУ. С. 263–277.
11. Назаров Ю.П. Расчётные параметры волновых полей сейсмических движений грунта. М.: Наука, 2015. 364 с.
12. Корчинский И.Л., Грилло А.А. Расчёт висячих покрытий на динамические воздействия (землетрясения, ветер). М.: Стройиздат, 1978. 220 с.
13. Поляков С.В. Сейсмостойкие конструкции зданий. М.: Высш. школа, 1983. 304 с.
14. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территории городов, населённых пунктов и больших строительных площадок. М.: Наука, 2009. 350 с.
15. Idriss I.M., Sun J.I. SHAKE 91 – A computer program for conduction equivalent linear seismic response analysis of horizontally layered soils. CGM research report, UC Davis, 1992.
16. Панасенко Н.Н., Синельщиков А.В. Методы решения дифференциальных уравнений движения в задачах сейсмостойкости грузоподъёмных кранов // Наука и практика – 2017. Всероссийская междисциплинарная научная конференция, 16–20 октября 2017 г. [Электронный ресурс]: материалы / Астрахан. гос. техн. ун-т. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2017.

Информация об авторах

Синельщиков Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства. E-mail: laex@bk.ru. Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 414056, Астрахань, ул. Татищева, д. 18.

Панасенко Николай Никитович, доктор технических наук, профессор кафедры техники и технологии наземного транспорта. E-mail: psastr@mail.ru. Астраханский государственный технический университет. Россия, 414056, Астрахань, ул. Татищева, д. 16.

Поступила в июле 2018 г.

© Синельщиков А.В., Панасенко Н.Н., 2018

^{1,*}*Sinel'shchikov A.V.*, ²*Panasenko N.N.*

¹*Astrakhan state University of architecture and civil engineering
Russia, 414056, Astrakhan, Tatishcheva, 1*

²*Astrakhan state technical University
Russia, 414056, Astrakhan, Tatishcheva, 16*

**E-mail: laex@bk.ru*

JUSTIFICATION OF SEISMIC STABILITY OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS TAKING INTO ACCOUNT THE WAVE PROPERTIES OF SEISMIC EFFECTS

Abstract. *The method of seismic stability calculation of the complex system of industrial building with a built-in technological equipment and lifting cranes in conjunction with a soil base is proposed. Industrial object is considered as a primary and secondary system. In contrast to the traditional approach of modelling seismic effects in the form of accelerograms (record acceleration at the ground surface), it is proposed to use a wave model of seismic effects in the form of soil base displacements (seismograms), which is included in the structure of dynamic model, taking into account the delay of volumetric seismic waves arrival. The subgrade is determined as the primary system. It perceives the seismic excitation that is transmitted to constructions and technological equipment. The estimated seismogram is obtained in conditions of actual ground state and seismological characteristics at the construction site. The proposed approach allows to study subsystems of buildings complex, taking into account their interaction. No additional simplifications are possible given the rotational component of the response of buildings during the passage of seismic waves, as well as the calculated analysis of seismic safety under the regime of collisions and possible collisions of blocks and building walls.*

Keywords: *method of dynamic analysis, linear-spectral method, seismic effects, finite element method, seismic resistance of buildings and structures, wave properties of seismic effects.*

REFERENCES

1. NP-031-01. The design standards of earthquake-resistant nuclear power plants. M.: Gosatomnadzor RF, 2002, 27 p.
2. NP-043-11. Rules for the Arrangement and Safe Operation of Cranes for Nuclear Power Facilities. Nuclear and Radiation Safety, 2014, no. 1 (71), pp. 11–24.
3. Construction in seismic regions. Updated version of SNiP II-7-81 *. M.: Minregionrazvitiya, 2014. 125 p.
4. Panasenko N.N., Sinel'shchikov A.V. Linear-spectral method of the theory of seismic resistance of lifting structures. Part 1. Mathematical model of computed seismic actions. Lifting and transport, 2017, no. 4-5 (90), pp. 2–7.
5. Panasenko N.N. Dynamics and seismic resistance of the handling equipment of nuclear power plants. Thesis. ... Doct. tech. sciences. In 2 parts. Part 1. Novocheerkassk: NSTU, 1992, 475 p.
6. Sinel'shchikov A.V. Dynamics and seismic stability of bridge cranes: Dissert. ... cand. tech. sciences. Astrakhan: ASTU, 2000, 276 p.
7. MR 1.5.2.05.999.0025-2011. Calculation and design of earthquake resistant nuclear power plants: methodical recommendations. M.: JSC "Concern Rosenergoatom", 2011, 92 pp.
8. RTM 108.020.37-81 (reprint with Change No. 1 of 1985). Equipment of nuclear power plants. Calculation of strength under seismic action. L.: NPO CKTI, 1986, 35 p.
9. RB 006 - 1998. Safety Guide. Determination of initial seismic ground motions for design bases. Utm. fast. Gosatomnadzor of Russia from 29.12.1998, no. 3.
10. Macelia V.I., Selev I.N., Skuridina E.S., Khafizov R.R., Panasenko N.N., Sinel'shchikov A.V., Probabilistic-static model of the calculated seismic effect on the OIAE in Zheleznogorsk. Bratsk: Publishing House of the BrSU, pp. 263–277.
11. Nazarov Yu.P. Calculated parameters of wave fields of seismic motions of soil. Moscow: Nauka, 2015, 364 p.
12. Korchinsky I.L., Grill A.A. Calculation of hanging coverages for dynamic effects (earthquakes, wind). Moscow: Stroizdat, 1978, 220 p.
13. Polyakov S.V. Seismic building structures. M: High school, 1983, 304 p.
14. Zaalishvili V.B. Seismic microzoning of the territory of cities, settlements and large construction sites. Moscow: Nauka, 2009, 350 p.
15. Idriss I.M., Sun J.I. SHAKE 91 – A computer program for conduction equivalent linear seismic response analysis of horizontally layered soils. CGM research report, UC Davis, 1992.
16. Panasenko N.N., Sinel'shchikov A.V. Methods of solving differential equations of motion in seismic stability of lifting cranes] Science and practice - 2017. All-Russian interdisciplinary scientific conference [Electronic resource]: materials / Astrakhan. state. tech. un-t. - Astrakhan: Publishing house of ASTU, 2017.

Information about the author

Sinelschikov, Alexey V. PhD, Assistant professor. E-mail: laex@bk.ru. Astrakhan state University of architecture and civil engineering. Russia, 414056, Astrakhan, Tatishcheva, 18.

Panasenko, Nikolay N. DSc, Professor. E-mail: psastr@mail.ru. Astrakhan state technical University. Russia, 414056, Astrakhan, Tatishcheva, 16.

Received in Jule 2018

Для цитирования:

Синельщиков А.В., Панасенко Н.Н. Обоснование сейсмостойкости зданий и сооружений с учётом волновых свойств сейсмического воздействия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №10. С. 52–63. DOI: 10.12737/article_5bd95a744377e9.98556143

For citation:

Sinel'shchikov A. V., Panasenko N.N. Justification of seismic stability of buildings and constructions taking into account the wave properties of seismic effects. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no. 10, pp. 52–63. DOI: 10.12737/article_5bd95a744377e9.98556143