

## К вопросу о корректном задании исходной сейсмической информации

Е.Н.Курбацкий, РУТ (МИИТ), Москва

В.Л.Мондрус, НИУ МГСУ, Москва

Е.А.Пестрякова, РУТ (МИИТ), Москва

Излагаются и сравниваются две концепции задания исходной сейсмической информации для расчёта сооружений на сейсмостойкость. Приводятся достоинства и недостатки каждой концепции. Обосновывается, что при использовании концепции динамические коэффициенты исходная сейсмическая информация задаётся некорректно.

Основные положения концепции динамических коэффициентов разрабатывались шестьдесят лет тому назад Л.И. Корчинским, когда скудная информация по землетрясениям представляла собой графики ускорений, записанные на бумажных лентах или фотоплёнках.

Отметим, что после вывода графиков динамического коэффициента Л.И. Корчинский пишет: «Таким образом, полученный график  $\beta$ , несмотря на допущенный при его построении ряд небесспорных допущений вполне характеризует динамический эффект землетрясений на сооружение» [3]. При этом И.Л. Корчинский предварительно анализирует работы М.А. Био и Г.В. Хаузнера [5–7], в которых описывается экспериментальное построение спектров ответов. И даже приводится спектр по проекту Калифорнийских норм, который не совсем верно называется Стандартным спектром ускорений.

В настоящее время можно получить полную информации о землетрясении, которое произошла два часа назад. Методы обработки информации и методы расчётов на сейсмические воздействия также существенно изменились.

Спектры реакций (ответов) – одна из наиболее важных, полезных и широко используемых концепций в теории и практике расчётов сооружений на сейсмостойкость. Предложенная почти сто лет назад, в настоящее время эта концепция используется во всех зарубежных нормативных документах и руководствах по расчёту сооружений на сейсмостойкость. Известно, что количество стран, в нормативных документах которых используется эта концепция, – более пятидесяти. Следует отметить, что эта концепция используется и в документах стран – бывших республик СССР.

Объясняется почему концепция спектров ответов, используемая в теории и практике расчётов сооружений на сейсмостойкость, является основной во всех зарубежных нормативных документах и руководствах по расчёту сооружений на сейсмостойкость.

Излагается история появления спектров ответов и теория построения расчётных спектров ответов. Доказываются достоинства и преимущества концепции спектров ответов по сравнению с концепцией динамических коэффициентов при задании сейсмической информации.

Предлагается отказаться в нормах Российской Федерации от концепции динамических коэффициентов, заменив её концепцией спектров ответов.

*Ключевые слова:* спектры ответов, динамические коэффициенты, максимальные реакции на сейсмические воздействия, сравнение концепций.

### On the Question of the Correct Assignment of the Seismic Input Information

E.N.Kurbatskiy, RUT (MIIT), Moscow

V.L.Mondrus, MGSU, Moscow

E.A.Pestriakova, RUT (MIIT), Moscow

Two concepts for setting initial seismic information for earthquake engineering are presented and compared. The advantages and disadvantages of each concept are given. It is argued that, when using the concept of dynamic coefficients, the initial seismic information is set incorrectly.

The main provisions of the concept of dynamic coefficients were developed sixty years ago by L.I. Korchinsky, when scarce information on earthquakes was represented by acceleration diagrams recorded on paper tapes or photographic films.

Note that after deducing graphs of dynamic coefficient, L.I. Korchinsky writes: "Thus, the obtained graph  $\beta$ , despite several doubtful assumptions made during its construction, quite characterizes the dynamic effect of earthquakes on a structure" [3]. At the same time, I.L. Korchinsky preliminary analyzes the works of M.A. Bio and G.V. Hausner [5–7], in which the experimental construction of the response spectra is described. And even the spectrum according to the project of the California norms, which is not quite correctly called the Standard Acceleration Spectrum, is given.

It is now possible to obtain complete information about an earthquake that occurred two hours ago. The methods for processing the information and the methods for calculating seismic effects have changed just as dramatically.

Response spectra (responses) are one of the most important, useful, and widely used concepts in the theory and practice of earthquake calculations of structures. Introduced almost a hundred years ago, nowadays this concept is used in all foreign normative documents and manuals on the calculation of structures for seismic resistance. It is known that the number of countries that use this concept in their regulatory documents is more than fifty. It should be noted that this concept is also used in the documents of the countries of the former USSR republics.

It is explained why the concept of response spectra used in the theory and practice of earthquake resistance calculations of structures is the basic one in all foreign normative documents and guides on earthquake resistance calculations of structures.

The history of the emergence of response spectra and the theory of constructing computational response spectra are presented. The advantages and benefits of the concept of response spectra compared to the concept of dynamic coefficients in setting seismic information are proved.

It is proposed to abandon the concept of dynamic coefficients in the norms of the Russian Federation, replacing it with the concept of response spectra.

*Keywords:* response spectra, dynamic factors, the maximal response to seismic impacts, comparison of concepts.

В 2019 году в первом номере журнала «Academia. Архитектура и строительство» была опубликована статья «Динамические коэффициенты или спектры реакций (ответов) сооружений на сейсмические воздействия?» [1]. В статье отмечалось, что в нормах РФ для оценки сейсмических воздействий продолжает использоваться (на наш взгляд) устаревшее понятие «коэффициент динамичности».

В четвёртом номере журнала «Academia. Архитектура и строительство» в 2019 году была опубликована статья «К вопросу о динамических коэффициентах в задачах о сейсмические воздействиях» [2]. Во второй статье мы представили доказательства ошибочных положений концепции коэффициентов динамичности при расчётах на землетрясения и описали достоинства и преимущества концепции спектров ответов по сравнению с концепцией динамических коэффициентов. Несмотря на убедительные доказательства, появились оппоненты – противники перехода на концепцию спектров ответов. И, как это не странно, это сотрудники АО «Атомэнергопроект», в нормах которой концепция спектров ответов используется с 2002 года.

Мы не против использования концепции динамических коэффициентов при расчётах на сейсмические воздействия при условии, что будут точно определены и динамические коэффициенты, и статические воздействия. Авторы статьи, один из которых бывший заведующий кафедрой теоретической механики МИИТ, а другой – заведующий кафедрой «Строительная и теоретическая механика» НИУ МГСУ, считают, что в нормативных документах не должны использоваться определения и параметры, не соответствующие непреложным канонам механики, и необоснованные положения.

В настоящей статье сопоставим два подхода при задании исходной информации и расчётов по спектральной теории: «концепцию динамических коэффициентов» и «концепцию спектров ответов». Мы полагаем, что в Нормах Российской Федерации исходная сейсмическая информация задаётся не вполне корректно.

## 1. Концепция динамических коэффициентов для использования при расчётах на землетрясения

### 1.1. История создания концепции динамических коэффициентов при использовании для расчётов на землетрясениях и основные положения теории

По нашему мнению, не стоит канонизировать работы, которые были выполнены в условиях значительно меньшей исходной информации и вычислительных возможностей. Шестидесять лет назад скудная информация по землетрясениям представляла собой графики ускорений, записанные на бумажных лентах или фотоплёнках. В настоящее время можно получить полную информацию о землетрясении, которое произошла два часа назад. Методы обработки информации и методы расчётов на сейсмические воздействия также существенно изменились. И не удивительно – в этой важной для безопасного существования людей области исследований работают тысячи специалистов земного шара. В качестве примера отметим, что в Стандарте ASCE/SEI 7-05 «Минимальные расчётные нагрузки на здания и сооружения» приведены фамилии около 300 участников.

Изложение положений динамических коэффициентов начнём с истоков её создания. Для этой цели рассмотрим основные положения теории, использованные И.Л. Корчинским шестьдесят лет назад [3] при определении графиков коэффициентов динамичности, которые были включены в СН 8-57 «Нормы и правила строительства в сейсмических районах». Причём, начнём с заключительной фразы после вывода графиков динамического коэффициента: «Таким образом, полученный график  $\beta$ , несмотря на допущенный при его построении ряд небесспорных допущений, вполне характеризует динамический эффект землетрясений на сооружение» [3]. При этом И.Л. Корчинский предварительно анализирует работы М.А. Био и Г.В. Хаузнера [5–7], в которых описывается экспериментальное построение спектров ответов. И даже приводится спектр по проекту Калифорнийских норм, который не совсем верно называется Стандартным спектром ускорений. Видимо, в результате неточного перевода. В американских нормах и технической литературе такие зависимости принято называть «response spectra» – спектры реакций. Под реакциями понимаются не только силовые факторы, но и максимальные перемещения, максимальные скорости и максимальные ускорения.

Проанализируем эти небесспорные допущения, о которых упоминал Корчинский, и оценим их влияние на конечный результат.

Первое очень спорное допущение – это представление функции, описывающей перемещение грунта, в виде ряда затухающий синусоид:

$$y_0 = \sum_{i=1}^n a_n e^{-\varepsilon_n t} \sin(\omega_i t + \gamma_i) \quad (1.1)$$

Непонятно, как это связано с реальными ускорениями!

Под статическим воздействием понимается сила тяжести, умноженная на отношение пикового ускорения к ускорению свободного падения, направленная по горизонтали. Имеет ли это физический смысл?

Для упрощения расчёт производится на одну затухающую синусоиду, частота которой может иметь различные значения. При расчёте на набор синусоид рассматриваются синусоиды, не взаимодействующие между собой. Было решено принять протяжённость горизонтальной части графика динамических коэффициентов в диапазоне от 0,15 до 0,3 секунды не на основании расчётов на реальные ускорения, а в результате обсуждения и сближения с зарубежными опытными данными. Отметим, что зарубежные опытные данные – это ни что иное, как спектры ответов, полученные в результате акселерограмм землетрясений, произошедших на территории США. То есть динамические коэффициенты сопоставлялись со спектрами ответов. Но несмотря на это, в работах наших учёных этот термин не был принят и никем не использовался.

### 1.2. Ошибочные положения концепции коэффициентов динамичности при расчёте на землетрясения

Как было отмечено в нашей статье [1], ни в одном из Сводов правил РФ по расчёту на сейсмические воздействия не даётся ни определений, ни способов построения «коэффициентов динамичности землетрясений». Это очень странное и непонятное положение. Во всех нормативных документах в первых разделах обязательно даются определения всех используемых параметров. Если используются функциональные зависимости, обязательно задаются способы их определения. Когда в наших нормах пишут, что динамические коэффициенты получены в результате статистических исследований, естественно возникает вопрос: что это за исследования? Непонятно, почему на каких-то интервалах функция, описывающая коэффициенты динамичности, линейно возрастающая, на каких то интервалах – постоянная, и, наконец, на других – убывающая по какому то закону.

По-видимому, в ответ на нашу (и не только нашу) критику сейсмических норм в проекте СП 14.13330.2019 появилось определение коэффициента динамичности через «статические перемещения» при землетрясениях, что, по нашему мнению, представляет собой насилие над основными понятиями механики. Приведём это «замечательное» определение.

«Коэффициент динамичности; КД: отношение максимального абсолютного значения динамического перемещения одномерного осциллятора к статическому перемещению. Динамические перемещения – это перемещения осциллятора во времени в ответ на сейсмическое воздействие, заданное в виде акселерограммы. Статическое перемещение – это перемещение осциллятора от действия статической инерционной нагрузки, соответствующей постоянному пиковому ускорению грунта».

Мы считаем, что такое определение не имеет физического смысла: для сейсмического воздействия невозможно

корректно определить статическое воздействие, которое надо умножить на коэффициент динамичности. Оно ничего не определяет и, по всей видимости, введено в текст только ради формального наполнения соответствующего раздела. Наличие в нормативных документах подобных бессмысленных понятий препятствует нормальной работе по совершенствованию нормативной базы и может не только увести в сторону от понимания явления, но и привести к неправильным решениям.

В многочисленных трудах российских учёных, посвящённых расчёту сооружений на сейсмические воздействия, нам не удалось найти корректное определение коэффициентов динамичности для землетрясений. Единственная известная нам работа, в которой делается попытка обосновать введение коэффициентов динамичности, – это статья «Определение коэффициента динамичности в расчётах на сейсмостойкость» [8]. Но к этой работе у нас имеются существенные критические замечания.

Рассматривается система с одной степенью свободы. Колебания такой системы при сейсмическом воздействии описываются дифференциальным уравнением:

$$\ddot{u}_r + 2\xi\omega\dot{u}_r + \omega^2 u_r = -\ddot{u}_g, \quad (1.2)$$

где:  $u_r$  – относительное перемещение массы;  $\ddot{u}_g$  – функция ускорений, описывающая колебания основания при землетрясении;  $\omega$  и  $\xi$  – собственная частота и относительный коэффициент демпфирования системы.

Мы специально записали дифференциальное уравнение в таком виде, чтобы ещё раз напоминать, что сейсмическое воздействие – это кинематическое воздействие на основание. Никаких сейсмических сил в природе не существует. Умножение на массу и деление на массу, чтобы ввести какую-то сейсмическую силу, ничего не меняет. Перейдём к содержанию статьи. Для определения статического воздействия отбрасываются два первых члена в дифференциальном уравнении (1.2). Отбрасывание первых двух членов в уравнении (1.2) с целью определения не реализуемого при землетрясении статического перемещения, по нашему мнению, не способствует пониманию физического явления.

Правая часть представляется в виде:  $\ddot{u}_g = \frac{m\ddot{u}_g}{m} = \frac{P(t)}{m}$ .

При  $P = const$ , отбрасывая манипуляции с сейсмической силой, получаем уравнение:

$$\omega^2 u_r = -\ddot{u}_g,$$

в котором ускорение грунта  $\ddot{u}_g$  принимается константой, которую обозначим  $\ddot{u}_{const}$ , а относительное перемещение, также постоянную величину, обозначим  $u_{CT}$ , тогда  $u_{CT} = \frac{\ddot{u}_{const}}{\omega^2}$ .

Таким образом, статическое воздействие не определяется корректно в соответствии с законами теоретической механики (так как землетрясение невозможно остановить), а задаётся вследствие каких-то необоснованных предпосылок.

Мы специально оставили в уравнениях обозначения, принятые в исходном уравнении, чтобы показать ошибочность исходной посылки, из которой следует, что статическое перемещение равно какому-то постоянному ускорению, делённому на квадрат собственной частоты.

Далее в работе [8] объясняется, каким образом строится динамический коэффициент по заданной акселерограмме. С использованием интеграла Дюамеля решается уравнение (1.2), в правой части которого задаётся акселерограмма колебаний грунта. В результате решения определяются максимальные ускорения осцилляторов с разными собственными частотами. Функцию максимальных ускорений, зависящую от частоты, не совсем правильно называют спектральным ускорением, на самом деле она является спектром максимальных реакций в ускорениях. Именно спектры ответов в ускорениях используются в динамических расчётах. Зачем делить эти функции на максимальное ускорение только для того, чтобы получить коэффициент динамичности, который потом снова умножается на это ускорение?

После двух страниц выкладок в работе даётся определение, что коэффициент динамичности – это нормированный на величину максимального ускорения спектр ускорений. То есть, если умножить динамический коэффициент на величину максимального ускорения, получится спектр максимальных ускорений, или спектр ответов в ускорениях. Возникает вопрос: что является статическим воздействием?

Кроме того, отметим, что неправильно использовать термин «спектральное ускорение» для спектра максимальных ускорений. Так как спектральным ускорением и спектром ускорений называют модуль спектра Фурье акселерограммы, который существенно отличается от спектра максимальных реакций в ускорениях.

Для чего такая путаница с определением коэффициента динамичности, которая, как нам кажется, в какой-то мере не совместима с положениями теоретической механики. Насколько всё проще и понятней при построении спектров ответов, покажем в следующих параграфах.

**2. Спектры ответов – фундаментальная концепция максимальных реакций сооружений на сейсмические воздействия**

Спектры реакций (ответов) – одна из наиболее важных, полезных и широко используемых концепций в теории и практике расчётов сооружений на сейсмостойкость. Предложенная почти сто лет назад, в настоящее время эта концепция используется во всех зарубежных нормативных документах и руководствах по расчёту сооружений на сейсмостойкость. Известно, что количество стран, в нормативных документах которых используется эта концепция, – более пятидесяти. Следует отметить, что эта концепция используется и в документах стран – бывших республик СССР.

Можно объяснить, почему эта концепция получила такое широкое распространение и признание во всём мире.

Во-первых, при расчётах сооружений на сейсмические воздействия для оценки прочности нет необходимости определять весь процесс колебаний, а достаточно определить максимальные ускорения, максимальные скорости и максимальные перемещения элементов конструкций. А спектры ответов или, как правильнее их называть, спектры максимальных реакций как раз представляют собой максимальные значения, характеризующие колебания элементов конструкций.

Во-вторых, спектры ответов имеют простое определение и ясный физический смысл.

В-третьих, существуют простые механико-математические модели, описывающие процесс построения спектров ответов.

В-четвёртых, концепцию можно использовать для анализа неупругих систем.

В-пятых, известными учёными мира разработаны руководства для построения расчётных нормативных спектров ответов, благодаря которым во многих странах были построены сейсмостойкие сооружения, выдержавшие воздействия сильных землетрясений.

К сожалению, в российских нормах эта концепция не нашла применения, несмотря на наши почти 20-летней давности предложения.

**3. Краткое изложение истории появления концепции и её определение**

Прежде чем дать определение концепции, опишем опыт директора Института исследования землетрясений Императорского Токийского университета К.А. Сюэхио [4]. Его анализатор сейсмических воздействий состоял из 13-ти осцилляторов, состоящих из различных масс, подвешенных на пружинах. Собственные частоты колебаний этих масс находились в диапазоне от 0,55 до 4,5 Гц, а периоды от 0,22 до 1,81 секунды (рис. 1).

Во время землетрясений колебания масс записывались на вращающиеся барабаны с целью фиксации их реакции на реальное сейсмическое воздействие. На каждой диаграмме выбиралась только одна точка – максимальное перемещение данной массы, которая наносилась на график, в котором по горизонтальной оси откладывались в масштабе частоты

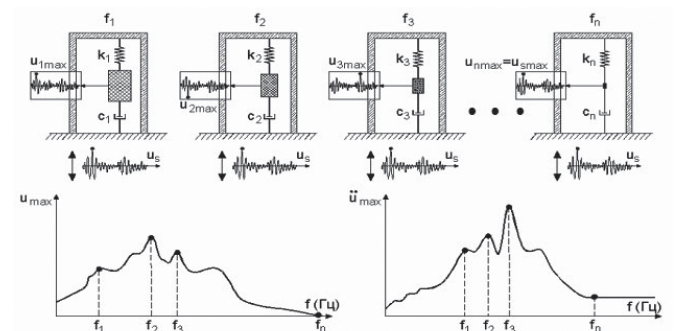


Рис. 1. Осцилляторы К.А. Сюэхио для экспериментального построения спектров ответов

(периоды) колебаний осцилляторов, а по вертикальной – максимальные значения перемещений масс при данном сейсмическом воздействии.

Таким образом в 1926 году впервые были получены экспериментальным путём спектры максимальных перемещений при воздействии реального землетрясения. В данном случае спектры ответов – это зависимости максимальных перемещений от частот собственных колебаний.

Позднее опыт К.А. Сюэхино был повторен в лабораторных условиях американскими учёными при разработке расчётных спектров ответов.

Спектры ответов можно получить и теоретическим путём.

**4. Теория построения расчётных спектров ответов на основании акселерограмм реальных землетрясений**

При построении спектров ответов с использованием акселерограмм реальных землетрясений определяется реакция систем с одной степенью свободы на кинематическое возбуждение основания. Модель системы с одной степенью свободы и акселерограмма реального землетрясения представлены на рисунке 2.

Дифференциальное уравнение движения таких систем при колебаниях основания имеет вид:

$$\ddot{u}_t + 2\zeta\omega\dot{u}_t + \omega^2u_t = -\ddot{u}_g, \tag{4.1}$$

где  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$  – частота собственных колебаний системы без учёта демпфирования;  $\zeta = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2m\omega}$  – относительный

коэффициент демпфирования (отношение реального демпфирования к критическому).

При сейсмическом воздействии кинематическое возмущение характеризуется функцией горизонтального или вертикального ускорения основания  $\ddot{u}_g$ . Отметим очень важный факт, который удивляет многих специалистов, воспитанных на псевдостатическом подходе и «динамических коэффициентах», – при землетрясениях наземные части сооружений не подвержены воздействиям никаких внешних сил. Внутренние напряжения и деформации в элементах сооружений создаются исключительно благодаря динамическим реакциям на движение их оснований. Сейсмические воздействия – это кинематические воздействия оснований, а инерционные силы, которые используются в расчётах, – это реакции на кинематическое воздействие.

Для построения спектров ответов на землетрясение в ускорениях, скоростях и перемещениях решается уравнение

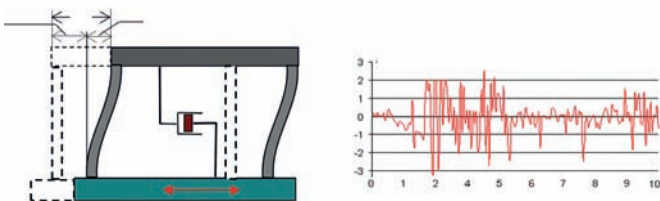


Рис. 2. Модель системы с одной степенью свободы и акселерограмма колебаний поверхности основания (грунта)

(4.1) для системы, имеющей собственную частоту  $\omega$  и относительный коэффициент демпфирования  $\zeta$ . Из решения выбирается только одно – максимальное – значение. Для получения решений используется интеграл Дюамеля и другие численные методы решения дифференциальных уравнений.

Из описания экспериментального метода (опыт К.А. Сюэхино) и теоретического определения максимальных значений ускорений, скоростей и перемещений (уравнение 4.1) следует корректное физически ясное определение спектров максимальных реакций.

При сейсмических воздействиях – это колебания основания, которое может быть задано акселерограммой колебаний поверхности грунта реального землетрясения, или представлено в виде синтезированной акселерограммы, полученной в результате статистической обработки акселерограмм нескольких землетрясений.

**5. Достоинства и преимущества концепции спектров ответов по сравнению с концепцией динамических коэффициентов при расчётах на землетрясения**

*5.1. В отличие от динамических коэффициентов существует простое и физически корректное определение спектров ответов*

«Спектр ответов – график максимальных реакций: перемещений, скоростей, ускорений или других максимальных параметров совокупности осцилляторов (систем с одной степенью свободы) на заданное воздействие. Ординаты спектра ответов – максимальные значения реакций осцилляторов на заданное воздействие, абсцисса спектра – собственные частоты осцилляторов или периоды собственных колебаний».

Под заданным воздействием при построении спектров максимальных реакций понимается расчётная акселерограмма землетрясения или набор акселерограмм.

*5.2. Логичная и простая методика построения спектров ответов*

В зависимости от того, какой спектр ответов строится, определяются максимальные ускорения, скорости или перемещения. Затем меняется собственная частота, и процесс повторяется. Для построения спектров ответов рассматривается весь возможный диапазон собственных частот сооружений и относительных коэффициентов демпфирования.

*5.3. Простая методика построения спектров ответов для систем с разными коэффициентами демпфирования*

Для учёта демпфирующих свойств конструкций из различных строительных материалов необходимо построить семейство спектральных кривых с различными относительными коэффициентами демпфирования, величина которых зависит от материала конструкций. Во многих нормативных документах при построении спектров ответов используются следующие коэффициенты демпфирования:

– для конструкций из стали коэффициент демпфирования равен  $\zeta = 0,02$ , если уровень напряжений меньше, чем  $\frac{1}{2}$  от напряжений предела текучести;

– для бетона коэффициент демпфирования зависит от уровня напряжений и находится в пределах от  $\zeta = 0,02$  до  $\zeta = 0,04$ ;

– для резинометаллических опор, которые используются при сейсмоизоляции, этот коэффициент может меняться в широких пределах от  $\zeta = 0,06$  до  $\zeta = 0,12$ .

Так как в упомянутых выше предыдущих наших публикациях уже были представлены графики спектров ответов с разными коэффициентами демпфирования, представлять рисунки не будем, а только отметим, что коэффициенты демпфирования существенно влияют на форму спектров ответов.

5.4. *Возможность использования спектров ответов для расчёта неупругих систем*

Считается нецелесообразным, экономически невыгодным и практически невозможным проектировать сооружения таким образом, чтобы при воздействии сильных землетрясений конструкции работали только в упругой стадии.

Две основные концепции, которые используются при построении спектров максимальных реакций для нелинейных систем: концепция эквивалентных перемещений и концепция эквивалентных энергий.

Концепция эквивалентных перемещений является одним из широко используемых методов, учитывающих нелинейное поведение и позволяет определять коэффициент, уменьшающий силовые воздействия. Концепция эквивалентных перемещений заключается в уменьшении упругих сил, для чего силы умножаются на понижающий коэффициент. Эта концепция является одной из основных в современных расчётах неупругих систем на сейсмические воздействия.

В соответствии с рекомендациями Ньюмарка и Холла при построении спектров ответов для неупругих систем используются спектры ответов упругих систем, которые корректируются множителями, величина которых зависит от частоты (периода).

Для определения спектров ускорения рекомендуется упругие спектры делить на коэффициент  $\sqrt{2\mu - 1}$ , величина

которого определяется из условия эквивалентности энергий для упругой и упругопластической системы. Таким образом, усилия, которые возникают в упруго пластической системе в  $\sqrt{2\mu - 1}$  раз меньше усилий, которые возникают в упругой системе при условии равенства поступивших в системы энергий.

Для построения спектра Ньюмарка и Холла необходимо использовать концепцию равных перемещений, уменьшая амплитуды линейного спектра в  $\mu$  раз в области малых частот (больших периодов), и использовать концепцию эквивалентных энергий, уменьшая амплитуды линейного спектра в  $\sqrt{2\mu - 1}$  раз в области высоких частот (малых периодов). Отметим, что при близких к нулю периодах линейный спектр не корректируется, так как в этом случае ускорение системы должно быть равно ускорению основания. Поэтому на графике проводится переходная линия (обозначена жёлтым цветом).

Концепция эквивалентных перемещений используется в следующих нормативных документах: IBC; NEHRP; ASCE-7; FEMA 273 и др.

Кроме спектров Ньюмарка-Холла в нормативных документах используются и другие спектры, учитывающие нелинейное поведение сооружений.

Подробное изложение концепций эквивалентных энергий и эквивалентных перемещений можно найти в Рекомендациях документа NEHRP<sup>1</sup> и в [9].

5.5. *Построение огибающих спектров ответов по набору акселерограмм землетрясений*

Существуют хорошо обоснованные и разработанные теория и методика построения расчётных спектров ответов. Для этой цели введены понятия псевдоспектров скоростей  $S_{pv}(\omega, \xi)$  и псевдоспектров ускорений  $S_{pa}(\omega, \xi)$ , справедливых для систем с малыми коэффициентами демпфирования  $0 < \xi < 0,2$ , к которым можно отнести большинство строительных конструкций. Между псевдоспектрами справедливы соотношения:

$$S_{pv}(\omega, \xi) = \omega S_d(\omega, \xi) = \frac{S_{pa}(\omega, \xi)}{\omega} . \quad (5.1)$$

Так как полученный таким образом спектр скоростей не является точным, его называют «псевдоспектром». Использование псевдоспектров позволяет представлять спектры ответов в трёхординатных логарифмических координатах. Учитывая зависимость (5.1), три графика, а именно: график псевдоспектров скоростей, график перемещений и график ускорений, – можно совместить в одном. Представление спектров максимальных перемещений, скоростей и ускорений на одном графике в логарифмических координатах позволило выявить закономерности практически любых сейсмических воздействий. Огибающие спектров большого количества землетрясений определили характерные точки на графиках

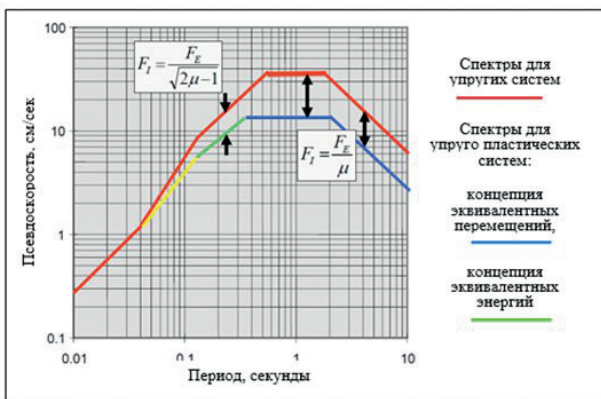


Рис. 3. График спектров ответов для неупругих систем

<sup>1</sup> NEHRP Recommendation Provision for New Building and Other Structures: Training and Instructional Material. FEMA 451B-June 2007.

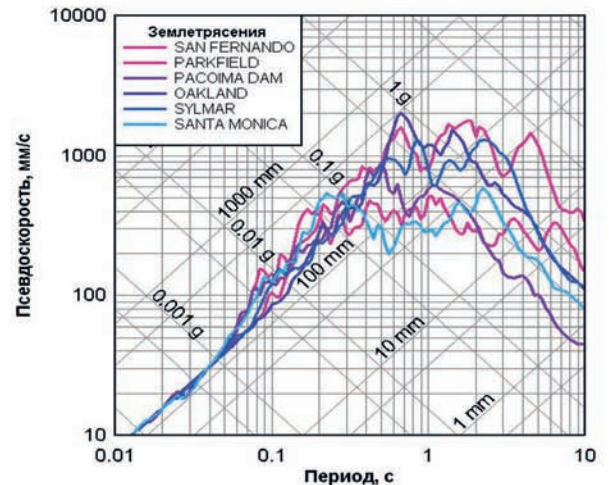
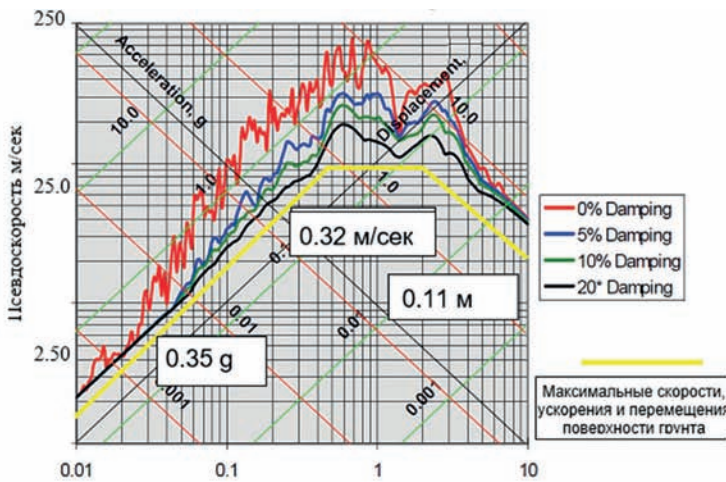


Рис. 4. Трёхординатные спектры для одного землетрясения с различными коэффициентами демпфирования и для шести различных землетрясений, указанных на рисунке, с коэффициентом демпфирования 5%. Максимальные перемещения, скорости и ускорения грунта представлены линией жёлтого цвета. Для удобства представления графиков жёлтая линия смещена вниз

спектров ответов. Эти точки делят расчётные спектры в области частот или периодов на характерные участки, в которых максимальные реакции: ускорения, скорости и перемещения – принимают постоянные значения. На рисунке 4 представлены трёхординатные спектры одного землетрясения и набора землетрясений.

Именно такие спектры используются для построения спектров в нормативных документах многих стран. Невооружённым глазом видно какой формы должны быть огибающие спектры. Ньюмарком и Холлом разработана методика построения огибающих спектров. На огибающем спектре видны характерные контрольные точки, которые используются при построении расчётных спектров.

На рисунке 5 показан пример расчётного спектра ответов (линия зелёного цвета). Пунктирная линия чёрного цвета соответствует пиковым значениям перемещений, скоростей и ускорений грунта поверхности грунта<sup>2</sup>.

Представленному выше расчётному спектру соответствует спектр максимальных ускорений, представленный в обычных координатах (рис. 6).

Таким образом, в зарубежных нормах, в отличие от российских, для построения спектров ответов существует ясная и понятная методика, представленная в этом пункте и подробно изложенная в монографии [10].

5.6. Возможность построения спектров ответов с учётом соотношения между спектрами ответов в скоростях и амплитудным спектром Фурье ускорений колебаний грунта

Между амплитудными спектрами Фурье и спектрами ответов в скоростях для систем с коэффициентом демпфирования

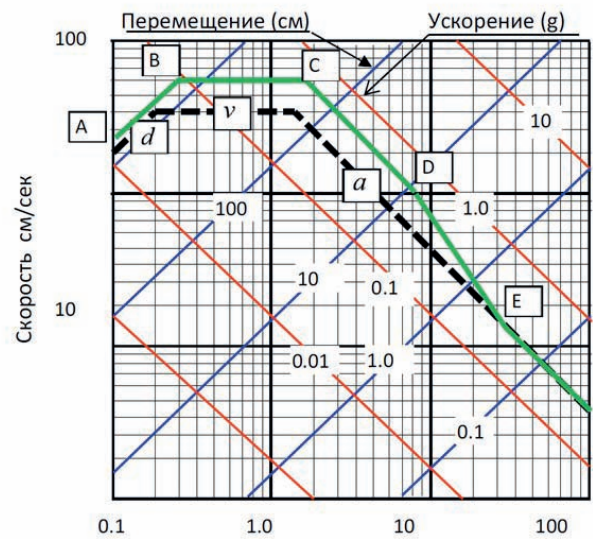


Рис. 5. Пример расчётного спектра

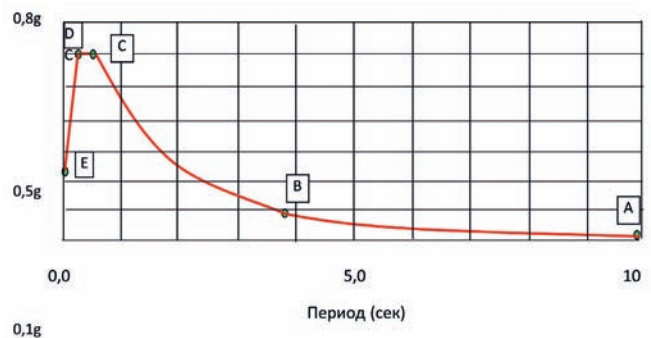


Рис. 6. Спектр максимальных ускорений в долях ускорения свободного падения

<sup>2</sup> ASCE/SEI 4-16 Seismic analysis of safety-related nuclear structures / American Society of Civil Engineers. 2017. | "ASCE standard.

равным нулю существует соотношение, которое давно (с 1956 года) известно зарубежным учёным [15]:

$$S_{pv}(\omega, 0) = |F[\dot{u}_g(t)]| \quad (5.2)$$

Российским учёным, как показывает общение на конференциях, это соотношение между спектрами Фурье и спектрами ответов неизвестно. Это одно из последствий ошибочной замены определения «спектров ответов», не имеющим физического смысла, определением «динамические коэффициенты».

В более позднее время (в 1973 году) американские учёные Ф.Е. Адвэдиа (F.E. Udvardi) и М.Д. Трифунек (M.D. Trifunac) опубликовали статью «Демпфированные спектры Фурье и спектры ответов» [12], в которой для определения взаимосвязи между спектрами Фурье и спектрами ответов для систем с демпфированием использовали новый функционал, который назвали «демпфированный спектр Фурье». Сотрудниками кафедры «Мосты и тоннели» РУТ (МИИТ) подготовлена статья: «Соотношение между спектрами Фурье и спектрами реакций на землетрясения», в которой для определения соотношений между спектрами используется теория функции комплексного переменного (ТФКП) и теория вычетов.

Соотношение между спектрами Фурье и спектрами ответов позволяет более быстро определять спектры ответов, не вычисляя тысячи точек реакций (перемещений, скоростей или ускорений), из которых выбирается только одна – максимум. Соотношения между спектрами Фурье и спектрами ответов удобно использовать для построения поэтажных спектров ответов.

#### *5.7. Специальные спектры ответов (зависимости максимальных ускорений от перемещений) для расчёта сейсмоизоляции сооружений*

Для того чтобы использовать концепцию спектров максимальных реакций для анализа параметров сейсмоизолирующих устройств, спектры реакций строятся в другой форме: по горизонтальной оси откладываются максимальные перемещения, по вертикальной – максимальные ускорения. На таких графиках периодам собственных колебаний соответствуют прямые радиальные линии, выходящие из начала координат. Примеры таких спектров и примеры оценки эффективности сейсмоизоляции также приведены в наших предыдущих публикациях.

В концепции, основанной на «динамических коэффициентах», провести такой анализ невозможно.

#### *5.8. Возможность построения относительных спектров максимальных перемещений*

При использовании концепции спектров максимальных ответов имеется возможность построения спектров максимальных относительных перемещений. Такие спектры позволяют определить размеры зон опирания пролётных строений на опорах мостов, при которых не будет сбросов пролётных строений при землетрясениях. Эти же спектры позволяют

оценить возможность соударений при землетрясениях рядом стоящих сооружений.

Можно определить относительные спектры максимальных перемещений с учётом соударений. Выполнить такие расчёты, основываясь на концепции динамических коэффициентов невозможно.

#### **Выводы**

Считаем, что разработчиками норм в СССР и РФ была допущена серьёзная методическая ошибка, когда спектры ответов свели к динамическим коэффициентам. Не одному поколению инженеров-проектировщиков (коэффициенты динамичности были введены в нормы шестьдесят лет назад) не известна такая удобная при задании исходной сейсмической информации и при выполнении расчётов концепция спектров ответов. К сожалению, следует отметить и такой факт: в течение последних пятидесяти лет в учебных пособиях для технических вузов и монографиях по сейсмостойкости сооружений, ориентированных на концепцию и написанных известными российскими учёными, о спектрах ответов даже не упоминается. Поэтому в нормативных документах следует отказываться от не имеющих физического смысла динамических коэффициентов при землетрясениях и при расчётах на сейсмические воздействия с использованием спектральной теории применять концепцию спектров ответов. Тем более что спектры ответов – более широкое понятие и, кроме спектра реакций в ускорениях, в расчётах (например, при расчёте сейсмоизоляции) удобно использовать спектры максимальных реакций в скоростях и спектры максимальных реакций в перемещениях. Следует отметить и такой факт: во многих программных комплексах, которые используют наши проектировщики, широко применяется концепция спектров ответов, не говоря уже о тех случаях, когда приходится проектировать сооружения по зарубежным нормам.

\* \* \*

Отметим такие общеизвестные факты. Землетрясения происходят вследствие движения тектонических плит. Движение тектонических плит происходит из-за мантийных теплогравиационных течений. Кроме того, при суточном вращении сжатие земного шара силами притяжения к солнцу составляет 1/230 [13]. Таким образом, земной шар каждую секунду подвергается воздействию, которые его деформируют. Возможно, и сейчас где-то в недрах земли уже накопились напряжения, которые могут разрядиться в виде подвижек и вызвать землетрясение. Это значит, что землетрясения происходили и будут происходить. К сожалению, в настоящее время невозможно предсказать, где, когда и с какой интенсивностью произойдёт очередное землетрясение. Единственная достоверная информация – это каталоги произошедших ранее землетрясений. Геологи, занимающиеся оценкой сейсмической опасности, считают прошлое ключом к будущему. Нам больше нравится другое соотношение между прошлым и будущим: «What's past

is prologue» (William Shakespear) – «Что прошло является лишь прологом».

Для того чтобы избежать неприятных и даже катастрофических последствий, необходимо проектировать и рассчитывать сооружения по нормам, учитывающим современные знания и научные достижения.

#### Литература

1. Курбацкий, Е.Н. Динамические коэффициенты или спектры реакций (ответов) сооружений на сейсмические воздействия / Е.Н. Курбацкий В.Л. Мондрус // *Academia. Архитектура и строительство*. – 2019. – № 1. – С. 107–114.
2. Курбацкий, Е.Н. К вопросу о динамических коэффициентах в задачах в задачах сейсмических воздействиях Е.Н. Курбацкий, В.Л. Мондрус, Г.А. Мазур // *Academia. Архитектура и строительство*. – 2019. – № 4. – С. 110–118.
3. Корчинский, И.Л. Сейсмостойкое строительство зданий / И.Л. Корчинский, Л.А. Бородин, А.Б. Гроссман [и др.] : Учебное пособие для вузов. – М. : Высшая школа, 1971.
4. Suyehiro, K. A seismic vibration analyzer and the records obtained therewith / K. Suyehiro // *Bulletin of the Earthquake Research Institute-University of Tokyo*. – 1926. – № 1. – P. 59–64.
5. Hudson, D.E. Response spectrum techniques in engineering seismology / D.E. Hudson // *Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering, Berkley, CA, 1956*.
6. Biot, M.A. A mechanical analyzer for the Prediction of Earthquake Stresses / M.A. Biot // *Bul. of the Seismic Soc. of America*. – 1953. – Vol. 45. – № 2.
7. Housner, G.W. *Bulletin of the Seismological Soc. of America*, Vol. 45, 2, 1953
8. Назаров, Ю.П. Определение коэффициента динамичности в расчётах на сейсмостойкость [Электронный ресурс] / Ю.П. Назаров, Е.В. Позняк // *Строительство: наука и образование*. – 2015. – № 1. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23150077&> (дата обращения 18.01.2021).
9. Chopra Anil K. *Dynamic of Structures / Chopra Anil K. // Theory and application to Earthquake Engineering*. – 2007. – P. 875.
10. Курбацкий, Е.Н. Спектры Фурье и спектры ответов на землетрясения. Теория и приложения / Е.Н. Курбацкий. – М. : СРОСЭКСПЕРТИЗА, 2018. – 156 с. ISBN 978-5-00077-755-8.
11. Udawadia, F.E. The Fourier Transform, Response Spectra and their relationship through the statistics of oscillator response / F.E. Udawadia, M.D. Trifunac // *Earthquake Engineering Research Laboratory, EERL 73-01*. – Pasadena : California Institute of Technology, 1973.
12. Udawadia, F.E. Damped Fourier spectrum and response spectra / F.E. Udawadia, M.D. Trifunac // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1973. – Vol. 63. – No. 5. – P. 1775–1783.
13. Ляв, А.Е. Математическая теория упругости / А.Е. Ляв. – М. : Главная редакция общетехнической литературы и номографии, 1935.

#### References

1. Kurbatskii E.N., Mondrus V.L. Dinamicheskie koeffitsienty ili spektry reaktsii (otvetov) sooruzhenii na seismicheskie vozdeistviya [Dynamic coefficients or spectra of reactions (responses) of structures to seismic effects]. In: *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and construction]*, 2019, no. 1, pp. 107–114. (In Russ., abstr.in Engl.)
2. Kurbatskii, E.N., Mondrus, V.L., Mazur G.A. K voprosu o dinamicheskikh koeffitsientakh v zadachakh v zadachakh seismicheskikh vozdeistviyakh [On the issue of dynamic coefficients in problems in problems of seismic effects]. In: *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and construction]*, 2019, no. 4, pp. 110–118. (In Russ., abstr.in Engl.)
3. Korchinskii I.L., Borodin L.A., Grossman A.B. [et al.] Seismostoi koe stroitel'stvo zdaniy [Earthquake-resistant construction of buildings]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1971. (In Russ.)
4. Suyehiro K. A seismic vibration analyzer and the records obtained therewith. In: *Bulletin of the Earthquake Research Institute-University of Tokyo*, 1926, no. 1, pp. 59–64. (In Engl.)
5. Hudson D.E. Response spectrum techniques in engineering seismology. In: *Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering, Berkley, CA, 1956*. (In Engl.)
6. Biot M.A. A mechanical analyzer for the Prediction of Earthquake Stresses. In: *Bul. of the Seismic Soc. of America*, 1953, Vol. 45, no. 2. (In Engl.)
7. Housner G.W. *Bulletin of the Seismological Soc. of America*, Vol. 45, 2, 1953. (In Engl.)
8. Nazarov Yu.P., Poznyak E.V. Opredelenie koeffitsienta dinamichnosti v raschetakh na seismostoi kost' [Determination of the dynamic factor in calculations for seismic stability]. In: *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: Science and Education]*, 2015, no. 1. Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23150077&> (Accessed 01/18/2021). (In Russ.)
9. Shopra Anil K. *Dynamic of Structures*. In: *Theory and application to Earthquake Engineering*, 2007, pp. 875. (In Engl.)
10. Kurbatskii E.N. Spektry Fur'e i spektry otvetov na zemletryaseniya. Teoriya i prilozheniya [Fourier spectra and spectra of responses to earthquakes. Theory and applications]. Moscow, Srosekspertiza Publ., 2018, 156 p. ISBN 978-5-00077-755-8. (In Russ.)
11. Udawadia F.E., Trifunac M.D. The Fourier Transform, Response Spectra and their relationship through the statistics of oscillator response. In: *Earthquake Engineering Research Laboratory, EERL 73-01*. Pasadena, California Institute of Technology Publ., 1973. (In Engl.)
12. Udawadia F.E., Trifunac M.D. Damped Fourier spectrum and response spectra. In: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1973, Vol. 63, no. 5, pp. 1775–1783. (In Engl.)
13. Lyav A.E, *Matematicheskaya teoriya uprugosti [Mathematical theory of elasticity]*. Moscow, Main edition of general technical literature and nomography, 1935. (In Russ.)

**Курбацкий Евгений Николаевич** (Москва). Доктор технических, академик РАТ. Профессор кафедры мостов и тоннелей ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (МИИТ). (127994, г. Москва, ул Образцова, д 9, стр. 9. МИИТ). Эл.почта: dynamic.miit@gmail.com.

**Мондрус Владимир Львович** (Москва). Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН. Заведующий кафедрой строительной и теоретической механики (СитМ) ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ» (129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. МГСУ). Эл.почта: mondrus@mail.ru.

**Пестрякова Екатерина Алексеевна** (Москва). Кандидат технических наук. Доцент кафедры «Мосты и тоннели» Российского университета транспорта. [127994, г. Москва, ул Образцова, д 9, стр. 9. РУТ (МИИТ)]. Эл.почта: Kate.pestriakova@gmail.com.

**Kurbatsky Evgeny N.** (Moscow). Doctor of Technical Sciences, Academician of the Russian Academy of Transport. Professor of the Department of Bridges and Tunnels at the FGAOU VO "Russian University of Transport" (MIIT) (9 Obraztsova st., building 9, Moscow, 127994. MIIT). E-mail: dynamic.miit@gmail.com.

**Mondrus Vladimir L.** (Moscow). Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of RAACS. Head of the Department of construction and theoretical mechanics at the Moscow State University of Civil Engineering (26 Yaroslavskoye Highway, Moscow, 129337. MGSU). E-mail: mondrus@mail.ru.

**Pestryakova Ekaterina A.** (Moscow). Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the Department of Bridges and Tunnels at the Russian University of Transport. (9 Obraztsova st., building 9, Moscow, 127994. MIIT). E-mail: Kate.pestriakova@gmail.com.