

## Динамические коэффициенты или спектры реакций (ответов) сооружений на сейсмические воздействия?

Е.Н.Курбацкий, МИИТ, Москва

В.Л.Мондрус, НИУ МГСУ, Москва

Существует большая разница в задании исходной сейсмической информации в нормах РФ и в нормах зарубежья. Практически во всех нормативных документах и руководствах по расчёту сооружений на сейсмостойкость технически развитых стран мира используется концепция спектров реакций (ответов) на землетрясения.

В нормах б. СССР и РФ для оценки сейсмических воздействий использовалось и продолжает использоваться понятие «спектральный коэффициент динамичности» –  $\beta$ .

Использование неудачных и ошибочных терминов может не только усложнить понимание явления, но и привести к неправильным решениям. К таким неудачным терминам можно отнести и термины «динамические коэффициенты», используемые в нормах РФ при расчёте на сейсмостойкость. Спектры ответов на землетрясения в перемещениях, скоростях или ускорениях имеют ясный и понятный физический смысл. Спектры ответов можно представить в нормах в стандартной форме или рассчитать индивидуальные, если строительные площадки характеризуются некоторыми специфическими свойствами. Например, поверхностные слои грунтов характеризуются малыми скоростями распространения поперечных волн или строительная площадка располагается на близком (в пределах 15 км) расстоянии от активного разлома.

Что представляют собой коэффициенты динамичности для сейсмических воздействий – непонятно. Ни в одном из Сводов правил РФ (имеются в виду документы: СП 14.13330.2018, СП 268.1325800.2016 и др.) по расчёту на сейсмические воздействия не даётся определения «коэффициента динамичности». Можно отметить, что и в монографиях российских авторов по расчёту сооружений на сейсмостойкость нет ни определений коэффициентов динамичности для землетрясений, ни способов расчёта.

Из нормативных документов РФ следует исключить понятие «динамические коэффициенты», заменив их спектрами реакций (ответов).

*Ключевые слова:* исходная сейсмическая информация, коэффициент динамичности, спектр ответов, зарубежные стандарты, российские нормы.

### Dynamic Coefficients or Response Spectra of Structures to Earthquake?

E.N.Kurbatskiy, MIIT, Moscow

V.L.Mondrus, MGSU, Moscow

There are big differences in definition of the seismic input in the norms of the Russian Federation code and in the foreign

countries standards. Almost all normative documents and guidelines for the earthquake resistance analysis of structures in technically developed countries of the world used the concept of the response spectra concept.

In the norms of the former USSR and the Russian Federation to assess the seismic effects used and continues to use the concept of "spectral coefficient of dynamism" –  $\beta$ . We believe that the concept is erroneous. The use of bad and erroneous terms can not only complicate the understanding of the phenomenon, but also lead to wrong decisions. Such unsuccessful terms include the terms "dynamic coefficients" used in the norms of the Russian Federation in the calculation of seismic resistance.

The displacements, velocities, or accelerations response spectra to earthquakes have a clear and understandable physical meaning. The response spectra can be represented in Codes in a standard site-independent form. Site-specific response spectra can be developed if the sites have some specific properties. For soft soil sites, characterized by soils having low shear wave velocity or for facilities within 15 km of active faults.

What are the "dynamic coefficients" for seismic effects is not clear. None of the codes of the Russian Federation (SP 14.13330.2018, SP 268.1325800.2016, etc.) does not provide a definition of the "dynamic coefficient" for seismic effects. It can be noted that in the monographs of Russian authors there are neither definitions of dynamic factors for earthquakes, nor methods for their developing.

The concept of "dynamic coefficients" should be excluded from the normative documents, replacing them with response spectra.

*Keywords:* seismic input, dynamic coefficient, response spectrum, foreign seismic standards, Russian code.

Задание исходной сейсмической информации в нормативных документах по расчёту сооружений на сейсмостойкость – одно из наиболее важных положений. Существует большая разница в задании исходной сейсмической информации в нормах РФ (СССР) и в нормах зарубежья.

Концепция спектров реакций (ответов) на землетрясения используется практически во всех нормативных документах и руководствах по расчёту сооружений на сейсмостойкость технически развитых стран мира. Количество стран, в нормативных документах которых используется эта концепция, более пятидесяти. Это все страны Европы, страны Азии, Север-

ной и Южной Америки, Австралии и т.д. Концепция спектров реакций используется в нормах по расчёту на сейсмостойкость зданий, транспортных сооружений и атомных станций.

В нормах СССР для оценки сейсмических воздействий использовалось понятие «спектральный коэффициент динамичности» –  $\beta$ . Кривые коэффициента динамичности  $\beta$  в этих нормах строятся как функции периода свободных колебаний осциллятора.

В РФ концепция спектров ответов используется только в нормах по расчёту на сейсмостойкость атомных станций [1], и надо полагать потому, что проектирование, строительство и эксплуатация АЭС контролируется специалистами МАГАТЭ.

Использование неудачных терминов может не только усложнить понимание явления, но и привести к неправильным решениям. К таким неудачным терминам можно отнести и термин «динамические коэффициенты», используемый в нормах РФ при расчёте на сейсмостойкость. «Коэффициент динамичности» в понимании инженера и студента технического вуза – это множитель, показывающий во сколько раз реакция на динамическое воздействие превышает реакцию на статическое воздействие. Для сейсмического воздействия не существует такого статического воздействия, которое надо умножать на коэффициент динамичности.

Следует отметить и такой факт: ни в одном из документов (имеются в виду документы: СП 14.13330.2018, СП 268.1325800.2016 и др.) не даётся определения «коэффициента динамичности». Нет определений и способов расчёта «коэффициента динамичности» и в монографиях известных российских учёных. С другой стороны, концепция спектров ответов как для линейных, так и для нелинейных систем, хорошо освещается в зарубежных научных источниках.

**Концепция коэффициентов динамичности при расчёте на землетрясения**

*Вводные замечания*

Как уже было отмечено, ни в одном из Сводов правил РФ по расчёту на сейсмические воздействия не даётся определения «коэффициента динамичности». Можно отметить, что и в монографиях российских авторов по расчёту сооружений на сейсмостойкость нет ни определений коэффициентов динамичности для землетрясений, ни способов расчёта. На одной из конференций, когда в докладе был отмечен этот факт, кто-то из разработчиков норм возразил, сказав, что определение коэффициента динамичности можно найти в «Российской архитектурно-строительной энциклопедии» [2]. Очень странное состояние дел. Проектировщики, которые должны часто использовать и хорошо представлять этот параметр, должны искать его определение в энциклопедии, которая имеется не в каждой библиотеке. Неужели этот параметр так очевиден? Кроме того, следует отметить, что и в указанной энциклопедии не нашлось ответа на вопрос: что такое коэффициент динамичности, который используется в нормах РФ? В разделе энциклопедии «Сейсмостойкость» [2, с. 412],

написанном Я.М. Айзенбергом, коэффициент динамичности входит в следующее выражение: «В середине 50-х годов XX века в нормах б. СССР и США вместо ускорений грунта при определении инерционных сейсмических сил стали учитывать ускорения точек сооружения равные произведению расчётных ускорений грунта на коэффициент динамичности...». Но это совсем не тот коэффициент, который рекомендуется в СП использовать для расчёта сооружений на сейсмостойкость. Кроме того, эти коэффициенты правильнее называть, как это принято в зарубежных нормах, «коэффициентами усиления колебаний» (amplification factor).

Эти динамические коэффициенты усиления колебаний были получены Ньюмарком ещё в 1978 году в результате обработки большого количества акселерограмм реальных землетрясений. Эти коэффициенты используются для построения спектров ответов во многих современных нормативных документах, в том числе и для расчёта на сейсмостойкость атомных станций [3]. Как используются эти «коэффициенты усиления колебаний» для построения спектров ответов показано ниже.

В зарубежных нормах коэффициенты динамичности, равные отношению максимального значения динамического перемещения к перемещению от статической нагрузки, не применяются, так как для землетрясения корректно определить такие коэффициенты невозможно.

*Ошибочные положения при определении коэффициентов динамичности землетрясений*

Докажем, что обоснование определения коэффициента динамичности, которое используется в различных российских научных источниках, ошибочно. Для доказательства рассмотрим математическую модель колебаний системы с одной степенью свободы при кинематическом возбуждении основания.

Для определения реакции системы с одной степенью свободы на кинематическое возбуждение основания используется расчётная схема, представленная на рисунке 1. Обращаем внимание на то, что на систему не действуют никакие внешние силы.

Дифференциальное уравнение движения такой системы имеет вид:

$$m\ddot{u}_a + c\dot{u}_a + ku_a = 0. \tag{1}$$

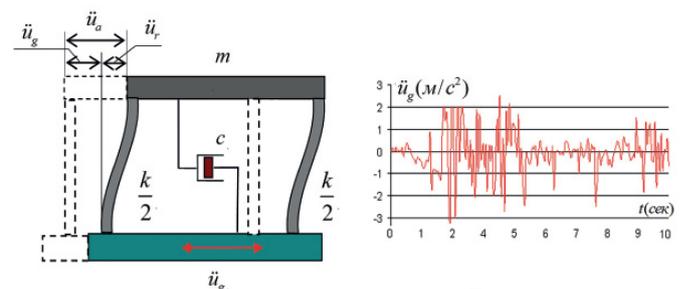


Рис. 1. Расчётная схема системы с одной степенью свободы и акселерограмма колебаний поверхности основания (грунта)

Учитывая, что  $\ddot{u}_a = \ddot{u}_g + \ddot{u}_r$ , где  $\ddot{u}_a$  – абсолютное ускорение,  $\ddot{u}_g$  – переносное ускорение и  $\ddot{u}_r$  – относительное ускорение, получим:

$$m\ddot{u}_r + c\dot{u}_r + ku_r = -m\ddot{u}_g. \quad (2)$$

Разделим левую и правую части уравнения на массу осциллятора:

$$\ddot{u}_r + 2\xi\omega\dot{u}_r + \omega^2 u_r = -\ddot{u}_g, \quad (3)$$

где  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$  – частота собственных колебаний системы без учёта демпфирования,

$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2m\omega}$  – относительный коэффициент демпфирования (отношение реального демпфирования к критическому).

В правой части уравнения (3) есть только один параметр, который характеризует кинематическое возмущение. Нет никаких сейсмических сил.

При сейсмическом воздействии системы подвержены кинематическому воздействию, которое характеризуется функцией горизонтального или вертикального ускорения основания  $\ddot{u}_g$ . Отметим очень важный факт, который упоминается в зарубежных нормах по расчёту сооружений на землетрясения технически развитых стран, а также в монографиях известных зарубежных учёных [4]. 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. При этом даже подчёркивается, что это именно так, несмотря на то, что часто используется концепция так называемых «эквивалентных статических сил».

Поэтому представление дифференциального уравнения колебаний системы с одной степенью свободы при кинематическом возбуждении основания, в правой части которого появляется какая-то несуществующая сила, как это делается в работе многих российских исследователей, уже не верно:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \omega^2 x = \frac{P(t)}{m}. \quad (4)$$

Умножение и деление правой части уравнения (3) на массу никаким образом не приводит к появлению силы. Как представляла правая часть переносное ускорение, так и будет представлять это ускорение. Замена в дальнейшем силы произведением массы на ускорение и сокращение на массу снова приводит правую часть к ускорению

Второе ошибочное действие заключается в отбрасывании первых двух членов уравнения (10) на основании того, что «в СНИП II-2-7-81\* заложен квазистатический метод расчёта». Возникает вопрос: как можно на основании свода правил отбрасывать в уравнениях какие-то члены, а какие-то – оставлять? Тем более, что далее при выводе коэффициентов динамичности эти члены снова учитываются.

Перейдём к уравнению (3), в котором обозначения в большей мере соответствуют физическому смыслу, чем в уравнении (4). Не проще было бы после отбрасывания в уравнении

первых двух членов и замене переносного ускорения постоянной величиной записать его в виде:

$$\omega^2 u_{r,CT} = \ddot{u}_{g,const}. \quad (5)$$

Именно такое соотношение получается после замены в уравнении (4) «сейсмической силы» произведением массы на постоянное ускорение:  $\ddot{u}_{g,const}$ .

Естественно, возникает вопрос, какую механическую модель описывает уравнение (5)? Основание сооружения перемещается с постоянным ускорением  $a$ . Какое же это землетрясение? Вследствие чего появляется относительное статическое смещение, если не учитывается масса? Таким образом, определение статического перемещения системы с одной степенью свободы при кинематическом возбуждении основания не верно.

Если предположить, что существует какое-то «мифическое» сейсмическое воздействие с постоянным ускорением  $a$ , тогда с этим же ускорением будет перемещаться и масса. Если основание будет перемещаться с постоянным ускорением какой-то интервал времени, то возникает вопрос: на какое расстояние оно переместится? В таком случае зависимость между статическим перемещением массы и ускорением основания можно записать в виде уравнения:

$$u_{CT} = ma \cdot c \rightarrow u_{CT} = m^2 a \omega^2. \quad (6)$$

Выражение  $x_{CT} = \frac{P}{m\Omega^2}$ , следующее из уравнения (4) при отбрасывании первых двух членов, не имеет физического смысла. Поэтому выкладки, используемые далее, для определения коэффициента динамичности не верны.

Для расчёта коэффициента динамичности необходимо знать перемещение при статической нагрузке и перемещение при динамическом нагружении. Если перемещение при динамическом воздействии определить несложно, то статическое нагружение при сейсмическом воздействии не существует.

### Концепция спектров ответов

*История появления концепции спектров максимальных реакций на землетрясения*

Кратко изложим историю и теорию концепции спектров ответов. Более подробное изложение теории можно найти в монографии [5]. Впервые идея использования спектров максимальных реакций для представления сейсмических воздействий была изложена в 1926 году в статье К. А. Сюэжиро

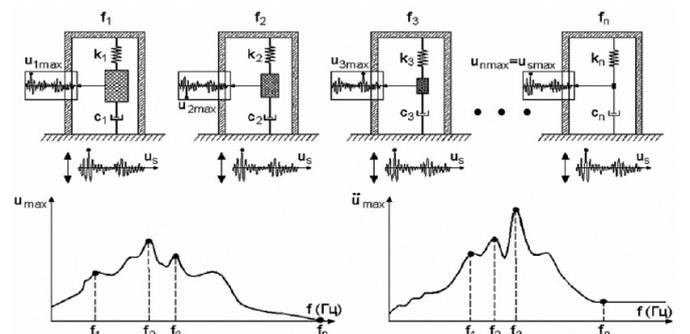


Рис. 2. Прибор Сюэжиро для экспериментального построения спектров ответов

[6]. Его анализатор сейсмических вибраций (рис. 2) состоял из 13-ти осцилляторов (различных масс, подвешенных на пружинах) с различными собственными частотами, изменяющимися в диапазоне от 0,55 до 4,5 Гц (или периодами в диапазоне от 0,22 до 1,81 сек).

Во время землетрясений колебания масс записывались на вращающиеся барабаны, фиксируя их реакцию на реальное сейсмическое воздействие. На каждой диаграмме выбиралась только одна точка – максимальное перемещение данной массы, которая наносилась на график, где по горизонтальной оси откладывались в масштабе частоты (периоды) колебаний осцилляторов, а по вертикальной – максимальные значения перемещений масс при данном сейсмическом воздействии.

Основы математической теории спектров ответов были изложены в докторской диссертации Био, выполненной под руководством фон Кармана. Он использовал разложение колебания сдвиговой балки по собственным формам, которой он моделировал здание, для определения реакции здания на произвольные движения грунта. Кроме того, он предложил разделить проблемы на две части, анализируя отдельно упругие свойства здания и частотный спектр землетрясений, представляя сейсмическое воздействие интегралом Фурье. В результате появилась возможность определить вклад каждой собственной формы в терминах амплитудного спектра Фурье. Эти исследования представлены в статьях [7, р. 398–403; 8, р. 262–268].

*Основные положения теории концепции спектров максимальных реакций*

Определение: «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» [9, р. 3–12; 10].

При сейсмических воздействиях – это колебания основания, которые могут быть заданы акселерограммой колебаний поверхности грунта реального землетрясения или представлены в виде синтезированной акселерограммы, полученной в результате статистической обработки акселерограмм нескольких землетрясений.

Для построения спектров максимальных реакций рассматриваются простейшие механические системы с одной степенью свободы, динамические свойства которых определяются тремя параметрами: массой  $m$ , жёсткостью  $k$  и демпфированием  $c$  (рис. 3).

Будем полагать, что система подвержена кинематическому воздействию, которое характеризуется функцией горизонтального или вертикального ускорения основания  $\ddot{u}_g$ .

Для определения спектра реакций системы с одной степенью свободы на кинематическое возбуждение основания используется расчётная схема, представленная на рисунке 1.

В общем случае амплитуды колебаний массы превышают амплитуды колебаний основания вследствие возникновения резонансных явлений. Для построения спектров реакций определяются максимальные перемещения, скорости и ускорения от заданного воздействия для всевозможных осцилляторов с собственными частотами, охватывающими диапазон частот сооружений с различными коэффициентами демпфирования. Подробное описание процедуры и примеры построения спектров реакций представлены в монографии «Спектры Фурье и спектры ответов на землетрясения» [5]. Для построения расчётных спектров ответов используется набор акселерограмм и строится огибающая кривая.

*Спектры и псевдоспектры максимальных реакций*

Для построения расчётных спектров реакций: ускорений  $S_a(\omega, \xi)$ ; скоростей  $S_v(\omega, \xi)$  и перемещений  $S_d(\omega, \xi)$  американскими учёными было предложено использовать псевдоспектры ускорений и скоростей, которые для малых относительных коэффициентов демпфирования практически не отличаются от реальных. Между псевдоспектрами существует простая зависимость:

$$S_{pv}(\omega, \xi) = \omega S_d(\omega, \xi) = \frac{S_a(\omega, \xi)}{\omega}. \tag{7}$$

Использование псевдоспектров позволяет строить три спектра на одном графике, используя логарифмические координаты.

Спектры различных землетрясений отличаются друг от друга. В качестве примера приведём графики спектров шести землетрясений, нормализованных к максимальному значению ускорения, равному  $0,5g$  (рис 4).

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 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.

Все эти данные вошли в современные нормативные документы, используемые при построении расчётных спектров. Исследованиями в этой области успешно занимались известные американские учёные Ньюмарк и Холл [11, р. 35–36], по-

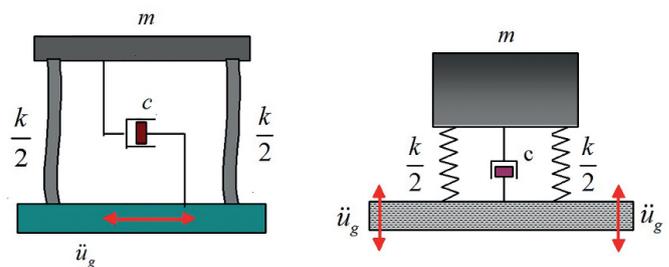


Рис. 3. Системы с одной степенью свободы

этому спектры, полученные с использованием разработанной ими методики, носят их имя.

По вертикальной оси на этих графиках откладываются псевдоскорости, по оси, направленной под углом 45°, псевдоускорения и по оси, направленной под углом -45° градусов, перемещения.

*Спектры максимальных реакций в нормативных документах*

После того, как К.А. Сюэжиро опубликовал результаты экспериментальных работ по определению спектров реакций на сейсмические воздействия, во многих странах было выполнено большое количество экспериментально-теоретических исследований в этой области. Концепция спектров максимальных реакций на землетрясения проста и понятна. Именно поэтому эта концепция используется практически во всех нормативных документах земного шара. Наиболее широкое распространение получила методика, разработанная учёными Ньюмарком и Холлом. [11]. Кратко опишем эту методику.

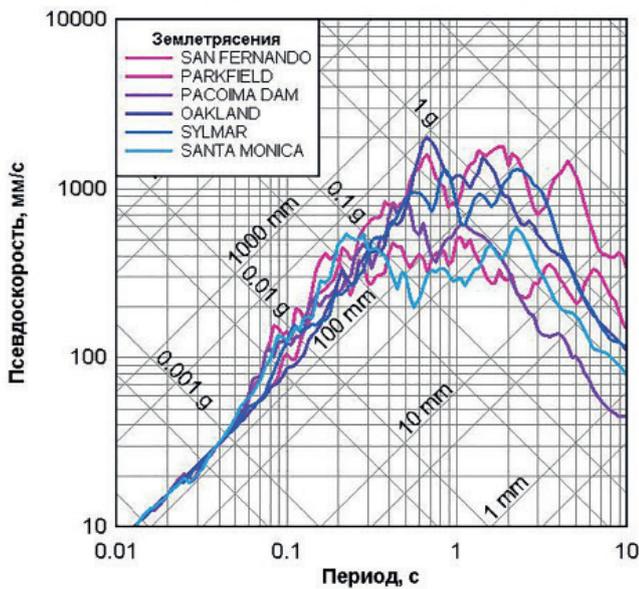


Рис. 4. Трёхординатные спектры шести различных землетрясений

**Таблица 1. Коэффициенты усиления колебаний Ньюмарка-Холла**

| Damping % Critical | One Sigma (84,1%) |       |       | Median (50%) |       |       |
|--------------------|-------------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
|                    | $a_s$             | $a_v$ | $a_d$ | $a_s$        | $a_v$ | $a_d$ |
| 0,05               | 5,10              | 3,84  | 3,04  | 3,68         | 2,59  | 2,01  |
| 1                  | 4,38              | 3,38  | 2,73  | 3,21         | 2,31  | 1,82  |
| 2                  | 3,66              | 2,92  | 2,42  | 2,74         | 2,03  | 1,63  |
| 3                  | 3,24              | 2,64  | 2,24  | 2,46         | 1,86  | 1,52  |
| 5                  | 2,71              | 2,30  | 2,01  | 2,12         | 1,65  | 1,39  |
| 7                  | 2,36              | 2,08  | 1,85  | 1,89         | 1,51  | 1,29  |
| 10                 | 1,99              | 1,84  | 1,69  | 1,64         | 1,37  | 1,20  |
| 20                 | 1,26              | 1,37  | 1,39  | 1,17         | 1,08  | 1,01  |

Ординаты горизонтальных расчётных спектров ответов (то есть спектра ускорения –  $S_a$ , спектра скорости –  $S_v$  и спектра перемещений –  $S_d$ ) получаются путём умножения пиковых характеристик движения грунта, определяемых такими параметрами, как пиковое ускорение  $a$ , пиковая скорость  $v$  и пиковое перемещение  $d$ , на коэффициенты усиления колебаний, представленных в таблице 1.

Таблица значений коэффициентов усиления была опубликована в 1982 году Ньюмарком и Холлом в статье «Earthquake Spectra and Design», в исследованиях института «Earthquake Engineering Research Institute» (Беркли, Калифорния). Именно эти коэффициенты в «Российской архитектурно-строительной энциклопедии» названы коэффициентами динамичности.

Коэффициенты усиления колебаний:  $a_s$ ,  $a_v$  и  $a_d$  для трёх областей спектра были получены в результате обработки большого набора акселерограмм, записанных на разных типах грунтов.

При определении пиковых значений колебаний грунта для строительных площадок с достаточно жёсткими основаниями, подверженных землетрясениям со значениями магнитуд от 6,5 до 7,0, приемлемыми являются отношения:  $v/a = 1,2$  m/s/g для грунтовых и  $v/a = 0,91$  m/s/g для скальных оснований, максимальные перемещения определяются из равенства  $ad/v^2 = 6$ .

Эти соотношения были получены в результате статистической обработки большого количества акселерограмм реальных землетрясений [12]. Соотношения считаются хорошо обоснованными и надёжными, поэтому используются в нормах по расчёту атомных станций [3].

Если значения магнитуд не лежат в этой области, рекомендуется выполнить специальные расчёты для определения более точных отношений  $v/a$  и  $ad/v^2$  или рассчитать специальный для данной строительной площадки спектр.

Приведём краткое изложение построения спектров ответов. Более подробное изложение можно найти в монографии [6].

Допустим, известно пиковое ускорение колебаний грунта  $\ddot{u}_g$ . Используя соотношения Ньюмарка, получим пиковые

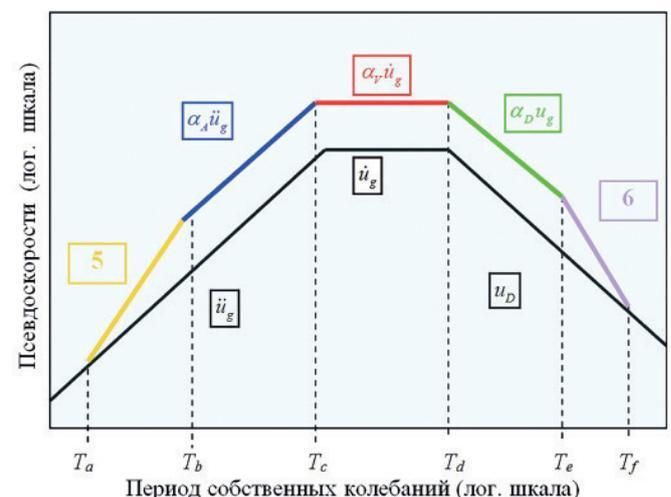


Рис. 5. Спектр Ньюмарка. Холла

скорости и пиковые перемещения грунта:  $\dot{u}_g$  и  $u_g$ . Построим график пиковых параметров колебаний грунта (чёрная линия на рисунке 5).

Используя коэффициенты усиления для заданного коэффициента демпфирования, построим отрезки прямых для трёх областей спектра ответов: синяя, красная и зелёная линия.

Значения фиксированных параметров  $T_a, T_b, T_c$  и  $T_f$  были получены в результате обработки спектров большого количества землетрясений для разных грунтовых условий (скальных грунтов, мягких грунтов и т.д.).

Проведём соединительные линии между точками с координатами от  $T_a$  до  $T_b$  и от  $T_c$  до  $T_f$ .

Отметим, что значения периодов  $T_a, T_b, T_c$  и  $T_f$  имеют фиксированные значения:

$T_a = 1/33$  сек,  $T_b = 1/8$  сек,  $T_c = 10$  сек и  $T_f = 33$  сек. Периоды  $T_c$  и  $T_d$  определяются точками пересечения констант  $A = \alpha_A \dot{u}_g$ ,  $V = \alpha_V \dot{u}_g$  и  $D = \alpha_D u_g$ , так как параметры  $\alpha_A, \alpha_V$  и  $\alpha_D$  зависят от демпфирования.

Если перейти от логарифмических к обычным арифметическим координатам спектр ответов примет вид, который обычно используется в нормативных документах. На рисунке 6 представлен график спектров ответов, принятых в Еврокоде, и график коэффициентов динамичности (РФ).

На спектрах откликов, представленных в зависимости от периодов колебаний рассчитываемых сооружений при воздействии реальных землетрясений, чётко выделяются четыре характерные точки: при  $T_0 = 0$ ,  $T = T_b$ ,  $T = T_c$  и  $T = T_d$ . Эти точки получены в результате обработки большого количества акселерограмм землетрясений. Происхождение этих характерных точек определяются на трёхординатных графиках спектров ответов ускорений, скоростей и перемещений, построенных в логарифмических координатах.

Представленная выше методика построения спектров ответов используется для построения.

*Расчёт на сейсмическое воздействие с использованием спектров ответа*

Реакция линейной системы с конечным числом степеней свободы на сейсмическое воздействие, определяется следующим дифференциальным уравнением:

$$[M]\ddot{U} + [C]\dot{U} + [K]U = -[M]\{U_b\}\ddot{u}_g, \quad (8)$$

где  $[M]$  – матрица масс ( $n \times n$ );  $[C]$  – матрица демпфирования ( $n \times n$ );  $[K]$  – матрица жёсткости ( $n \times n$ );  $U$  – вектор-столбец относительных перемещений ( $n \times 1$ );  $U_b$  – вектор-столбец

относительных скоростей ( $n \times 1$ );  $\ddot{U}$  – вектор-столбец относительных ускорений ( $n \times 1$ );  $U_b$  – вектор влияния, вектор смещения точек конструкции при перемещении опоры на единицу длины в направлении сейсмического движения ( $n \times 1$ );  $n$  – число степеней свободы;  $\ddot{u}_g$  – ускорение грунта.

Уравнения (8) могут быть представлены в виде независимых уравнений путём разложения по собственным формам колебаний, используя преобразование:

$$\bar{U} = [\Phi] \bar{Y}, \quad (9)$$

где  $[\Phi]$  – нормированная матрица форм колебаний;  $[\Phi]^T [M] [\Phi] = [1]$ ;  $[1]$  – единичная матрица размера ( $k \times k$ );  $\bar{Y}$  – вектор нормальных или обобщённых координат ( $k \times 1$ );  $k$  – число учтённых форм колебаний.

Преобразование системы уравнений (9) разделит уравнение движения в тех случаях, когда величины  $[\Phi]^T [M] [\Phi]$ ,  $i \neq j$  являются малыми и ими можно пренебречь. В противном случае можно воспользоваться методом Рэлея, представляя матрицу демпфирования в виде линейной комбинации матриц жёсткости и масс.

Независимое дифференциальное уравнение движения для каждой формы колебания может быть записано следующим образом:

$$\ddot{Y}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{Y}_j + \omega_j^2 Y_j = -\Gamma_j \ddot{u}_g, \quad (10)$$

где  $Y_j$  – обобщённые координаты  $j$ -той формы колебаний;  $\xi_j$  – коэффициент относительного демпфирования для  $j$ -той формы колебаний;  $\omega_j$  – круговая частота  $j$ -той формы колебания системы (rad/s);  $\Gamma_j$  – модальный коэффициент участия для  $j$ -той формы колебания;

$$\Gamma_j = \frac{\{\Phi_j\}^T [M] \{U_b\}}{\{\Phi_j\}^T [M] \{\Phi_j\}}. \quad (11)$$

Отметим также, что и для систем с  $n$  степенями свободы, что при землетрясениях наземные части сооружений не подвержены воздействиям никаких внешних сил. В правых частях уравнений (8) и (10) присутствуют только параметры, характеризующие кинематическое воздействие.

Используя собственные частоты, коэффициенты демпфирования и коэффициенты участия форм [см. уравнение (7)], по спектрам ответов в ускорениях, скоростях и перемещениях определяются максимальные параметры, характеризующие колебания по каждой форме. Суммирование модальных откликов для определения внутренних усилий и перемещений производится по правилам суммирования, которые регламентируются нормами.

**Сравнение динамических коэффициентов в нормах РФ и спектров ответов**

В предыдущей статье авторов: «Критический анализ состояния нормативной документации по расчёту сооружений на землетрясения» [13] приводится сравнительный анализ динамических коэффициентов в нормах РФ и спектров откликов в Еврокодах. Описываются преимущество концепции спектров ответов при задании исходной сейсмической

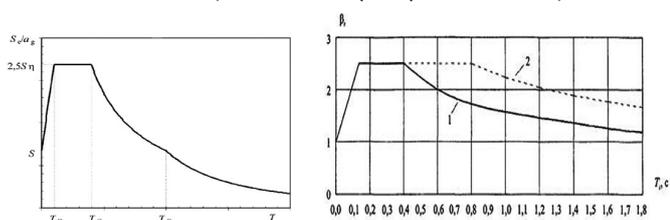


Рис. 6. Форма спектров ответов в обычных координатах и коэффициентов динамичности (РФ)

информации и ошибочные положения и даже ошибки при использовании динамических коэффициентов.

График коэффициентов динамичности  $\beta(T)$ , предложенный более 60 лет назад, был получен в условиях ограниченного в то время количества инструментальных данных. Практически все имеющиеся в то время инструментальные записи землетрясений были аналоговыми. В настоящее время существуют базы инструментальных записей колебаний грунта, описывающие сейсмические воздействия. Отметим наиболее популярные: «European Strong Motion Database», «ISNM», «K-NET», «KIK-NET» и др.

Используя эти базы, можно получить информацию о более чем 50 тысячах землетрясений, которые произошли за последние тридцать лет в различных точках земного шара, в том числе и на территории РФ.

Кроме характеристик, описывающих источники землетрясений (магнитуды, глубины и типа очага, координат), приводятся данные о инженерно-геологических условиях и скорости распространения поперечных волн в слоях грунтов на глубину до 30 м.

Используя эти данные, зная инженерно-геологические условия строительной площадки и, конечно, владея методикой построения спектров ответов, можно рассчитывать индивидуальные спектры реакций в перемещениях, скоростях и ускорениях.

Считаем, что разработчиками норм СССР и РФ была допущена серьёзная методическая ошибка, когда при задании исходной сейсмической информации были использованы динамические коэффициенты, а не спектры реакций (ответов).

Что такое спектры ответов (реакций) можно точно определить. Что такое «динамические коэффициенты» – непонятно! Определения, которые даются в разных источниках, либо неверны, либо неопределённые. Использование неудачных терминов может не только усложнить понимание явления, но и привести к неправильным решениям.

Неужели наших разработчиков норм не поразило такое различие в формах спектров в российских и в зарубежных нормативных документах (см. рис. 6). Может не стоит, как говорят англичане, «изобретать колесо», а воспользоваться хорошо разработанной теорией

Спектры ответов на землетрясения в перемещениях, скоростях или ускорениях имеют ясный и понятный физический смысл. Спектры ответов можно представить в нормах в стандартной форме или рассчитать индивидуальные, если строительные площадки характеризуется некоторыми специфическими свойствами. Например, для строительных площадок с поверхностными слоями грунтов, характеризующихся малыми скоростями распространения поперечных волн, или при близком (в пределах 15 км) расположении активного разлома.

В российских нормативных документах и монографиях по сейсмостойкости сооружений нет корректного определения

коэффициентов динамичности землетрясений. Отсутствует методика построения этих коэффициентов. Определить коэффициенты динамичности для землетрясений, не нарушая законы динамики, невозможно.

Спектры реакций (ответов) одна из наиболее важных, полезных и широко используемых концепций в теории и практике расчётов сооружений на сейсмостойкость. Предложенная более 90 лет назад, эта концепция используется во всех зарубежных нормативных документах и руководствах по расчёту сооружений на сейсмостойкость.

Поэтому выражаем твёрдое убеждение, что из нормативных документов следует исключить понятие «динамические коэффициенты», заменив их спектрами реакций (ответов).

#### Литература

1. Расчёт и проектирование сейсмостойких атомных станций. МР 1.5.2.05.999.0025. – М., 2011.
2. Российская архитектурно-строительная энциклопедия. В 14-ти томах. Т. 2. – М. : Министерство строительства РФ, 1995.
3. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures «ASCE standard ASCE/SEI 4-16» / American Society of Civil Engineers. – 2017.
4. Chopra Anil K. Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering / Person Education Inc. – Upper Saddle River, New Jersey, 2007. – 876 pc.
5. Курбацкий Е.Н. Спектры Фурье и спектры ответов на землетрясения. Теория и приложения / Е.Н. Курбацкий. – М. : EACA (Eurasian SEISMO Association) : АНО «СПОСЭКСПЕРТИЗА» «Onebook.ru», 2018. – 156 с.
6. Suyehiro K. A Seismic Vibration Analyser and the Records Obtained Therewith // Bulletin of the Earthquake Research Institute-University of Tokyo. – 1926. – №1. – P. 59–64.
7. Benioff H. The Physical Evaluation of Seismic Destructiveness // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1934. – № 24.
8. Biot V.A. Theory of Elastic System Vibration under Transient Impulse with Application to Earthquake-Proof Buildings / Proceeding of the National Academy of Science. – U.S.A., 1933/ – № 19 (2).
9. Chopra Anil K. Elastic Response Spectrum: a Historical Note. Earthquake // Engineering and Structural Dynamics. – 2007. – № 36.
10. Hudson D.E. Response Spectrum Techniques in Engineering Seismology / Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering. – Berkley, CA, 1956.
11. Newmark N.M. Earth Spectra and Design / N.M. Newmark, W.J. Hull; Earthquake Engineering Research Institute. – Berkley, Calif., 1982.
12. Newmark, N.M. Development of Criteria for Seismic Review of Selected Nuclear power Plants / N.M. Newmark, W.J. Hull; NUREG/ CR-0098, U.S. Nuclear Regulatory Commission. May, 1975.

13. Курбацкий Е.Н. Критический анализ состояния нормативной документации по расчёту сооружений на землетрясения / Е.Н. Курбацкий, Г.З. Мазур, В.Л. Мондрус АСADEMIA. Архитектура и строительство. – 2017. – № 2. – С. 95–102.

#### *Literatura*

1. Raschet i proektirovanie sejsmostojkih atomnyh stantsij. MR 1.5.2.05.999.0025. – М., 2011.

2. Rossijskaya arhitekturno-stroitel'naya entsiklopediya. V 14-ti tomah. T. 2. – М. : Ministerstvo stroitel'stva RF, 1995.

5. *Kurbatskij E.N. Spektry Fur'e i spektry otvetov na zemletryaseniya. Teoriya i prilozheniya* / E.N. Kurbatskij. – М. : EASA (Eurasian SEISMO Association) : АНО «SROSEKSPERTIZA» «Onebook.ru», 2018. – 156 s.

13. *Kurbatskij E.N. Kriticheskij analiz sostoyaniya normativnoj dokumentatsii po raschetu sooruzhenij na zemletryaseniya* / E.N. Kurbatskij, G.Z. Mazur, V.L. Mondrus // АСADEMIA. Arhitektura i stroitel'stvo. –2017. – № 2. – S. 95–102.

**Курбацкий Евгений Николаевич** (Москва). Доктор технических, академик РАТ. Профессор кафедры мостов и тоннелей Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II (МИИТ). (127994, г. Москва, ул Образцова, д 9, стр. 9. МИИТ). E-mail: 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). E-mail: mondrus@mail.ru.

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

**Mondrus Vladimir Lvovich** (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.