



А. Г. ТЯПИН
доктор технических наук

АО «Атомэнергопроект», г. Москва

УДК 624.042.7

СОПОСТАВЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УСИЛИЙ ПОД ПОДОШВОЙ И МАКСИМАЛЬНЫХ УСКОРЕНИЙ ЖЕСТКОГО ФУНДАМЕНТА КАК СРЕДСТВО ПРОВЕРКИ РАСЧЕТОВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В статье обсуждаются вопросы проверки результатов громоздких расчетов сейсмической реакции системы «сооружение-основание» в обозримом формате. Комбинированный асимптотический метод (КАМ) позволяет проводить такую проверку в нескольких местах. В статье обсуждается конкретный пример выявления допущенной ошибки с помощью сопоставления максимальных усилий под подошвой фундамента и максимальных ускорений на этой подошве, вычисленных по КАМ в предположении о жесткости подошвы. Исследуется влияние двух факторов, нарушающих простое соотношение, основанное на втором законе Ньютона. Первый фактор – податливость верхнего строения. Второй фактор – наличие вращательных компонент реакции фундамента при отсутствии вращательных компонент в воздействии на свободной поверхности основания. Предлагается после расчетов по КАМ вычислять простые безразмерные отношения вычисленных усилий к ускорениям с учетом инерции. Эти отношения для одномерного движения жесткого тела должны быть равны единицам. Для реального сооружения в силу указанных выше факторов они от единицы отличаются, но масштаб этих отличий должен оставаться в разумных пределах. В случае появления сомнений предлагается провести дополнительные расчеты по КАМ, исключая податливость и повороты. При этом громоздкие модальные расчеты модели сооружения на защемленном фундаменте и расчеты импедансов фундамента на слоистом основании не повторяются. Если после исключения податливости верхнего строения и поворотов фундамента отношения не приходят к единице, это является

признаком наличия ошибки. Дополнительным средством проверки является сравнение спектров поступательных ускорений на фундаменте во всех вариантах со спектрами для воздействия – на малых частотах они должны совпадать.

Ключевые слова: сейсмическая реакция, взаимодействие сооружений с основанием, проверка результатов динамических расчетов, комбинированный асимптотический метод.

Расчеты современных моделей ответственных сооружений на сейсмические воздействия являются очень громоздкими и трудно обозримыми: модели сооружений имеют десятки тысяч степеней свободы, учет динамического взаимодействия с основанием является обязательным и добавляет сложности в модель рассчитываемой системы. Поэтому актуальным является поиск таких форматов, в которых можно было бы проводить обозримое сопоставление различных результатов с целью проверки их разумного соответствия. Это не гарантирует от наличия ошибок, но дает возможность выявить, по крайней мере, их часть.

Комбинированный асимптотический метод (КАМ) [1] позволяет проводить подобные сверки на нескольких этапах расчетов. Одним из таких этапов является последний этап т.н. «первой опции» КАМ, когда определяется, с одной стороны, шестикомпонентное движение жесткого фундамента,

а с другой стороны, – интегральные силы под подошвой сооружения. Сразу оговоримся, что рассматривается линейная задача, и интегральные силы под подошвой появляются в результате только динамической реакции; интегральные силы от веса сооружения здесь не рассматриваются. И силы, и ускорения определяются в КАМ в виде реализаций во времени, но для сопоставления используются, главным образом, максимальные по модулю значения, которые определяются из временных реализаций. В данной статье на примере конкретного сооружения иллюстрируется методика сопоставления максимальных интегральных усилий под подошвой с максимальными ускорениями жесткого фундамента.

Несколько слов о сути КАМ. Метод предназначен для динамического расчета на сейсмические воздействия системы «сооружение-основание» в линейной постановке. Ключевым является допущение о жесткости контактной поверхности между сооружением и основанием (на практике эта жесткость обеспечивается подкрепляющим влиянием стен нижнего этажа). К этой контактной поверхности, которая имеет всего шесть степеней свободы, как бы «конденсируются» по отдельности и основание (оно на практике является бесконечным, инерционным и неоднородным), и сооружение (оно на практике моделируется с помощью метода конечных элементов очень детально). К той же поверхности «конденсируются» и сейсмические нагрузки. В итоге формируется и решается в частотном диапазоне система размерностью всего лишь 6×6 , хотя модели и основания, и сооружения сами по себе могут иметь много тысяч степеней свободы. Из решения этой системы определяются передаточные функции к движению контактной поверхности, после чего ее шестикомпонентное движение во времени рассчитывается с помощью быстрого преобразования Фурье. Параллельно вычисляются шесть компонент интегральных сил под подошвой жесткого фундамента. Далее в т.н. «первой опции» КАМ динамический расчет сооружения проводится по обычной схеме «защемленного фундамента», только движение этого фундамента задается по результатам

описанного выше расчета. Подробности метода читатель может найти в [1].

Если бы движение фундамента было одномерным (скажем, вертикальная реакция симметричного сооружения на однокомпонентное вертикальное воздействие), а само сооружение было бы абсолютно жестким, то соотношение между поступательными силами и ускорениями было бы очень простым. Оно непосредственно вытекало бы из второго закона Ньютона: максимальная по модулю сила под подошвой равнялась бы произведению массы сооружения на максимальное по модулю ускорение фундамента.

$$F = M A \quad (1)$$

При этом максимальные по модулю ускорение A и сила F реализовывались бы одновременно.

Однако в реальности существует как минимум два фактора, которые «портят» это простое соотношение.

Первый фактор – неоднородность движения фундамента. Хотя мы и исходим в первой опции КАМ из предположения о жесткости контактной поверхности между сооружением и грунтом, у этой контактной поверхности все-таки имеется не одна, а шесть степеней свободы, и все они в общем случае задействованы в сейсмической реакции на трехкомпонентное воздействие. Даже если сооружение остается абсолютно жестким, из-за угловых компонент движения контактной поверхности соотношение (1) между ускорениями A подошвы фундамента и интегральными усилиями F больше не выполняется.

Второй фактор – податливость верхнего строения. КАМ использует предположение о жесткости только контактной поверхности; все остальное сооружение в общем случае является податливым. Эта податливость в КАМ характеризуется набором частот, коэффициентов участия форм и коэффициентов композитного модального демпфирования для модели сооружения на защемленной контактной поверхности. Обычно эта поверхность совпадает с подошвой фундамента, но для существенно заглубленных сооружений

НАКОПЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ МОДАЛЬНЫХ МАСС

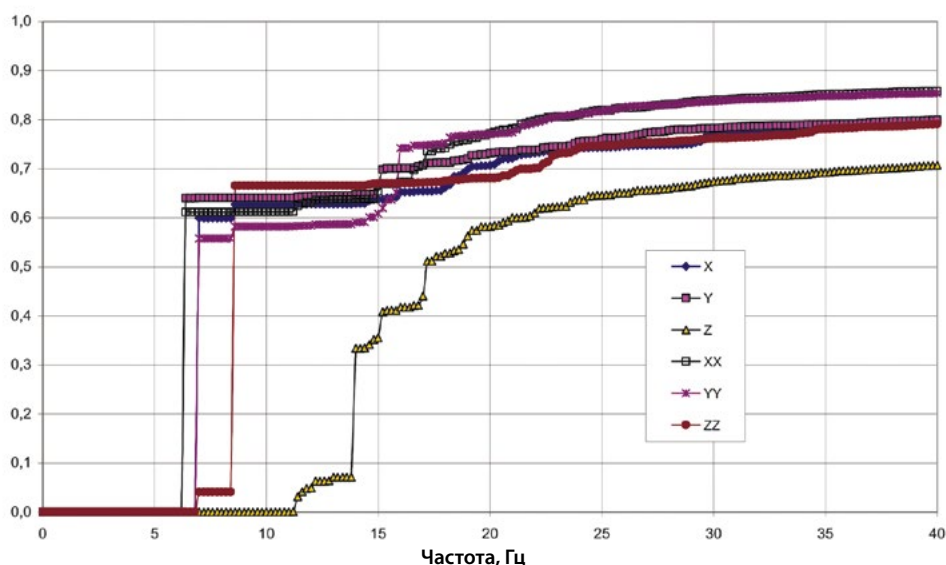


Рисунок 1 — Накопление относительных модальных масс

ПОСТУПАТЕЛЬНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ МАССЫ, Т

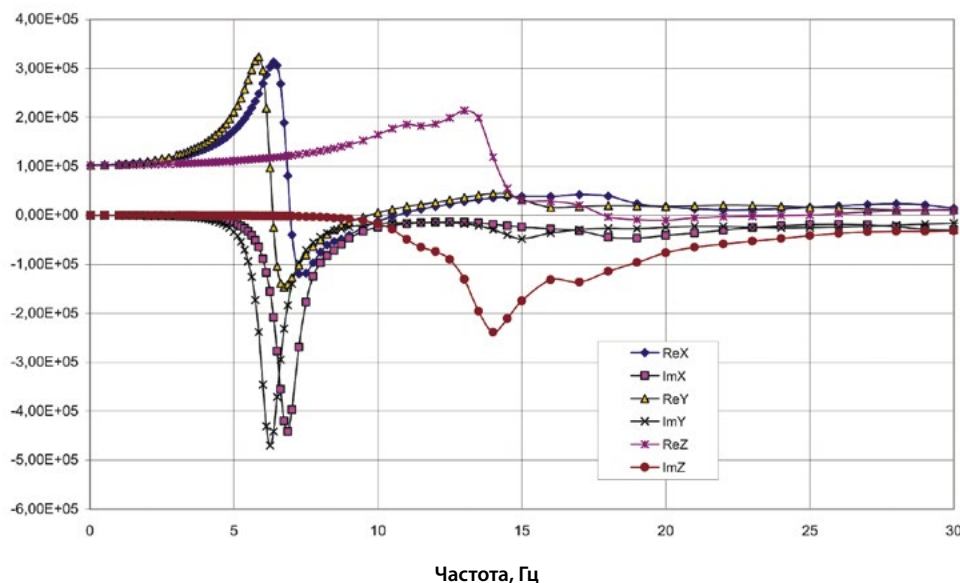


Рисунок 2 — Динамические массы в поступательных направлениях

к подошве добавляется нижняя часть заглубленных стен фундамента. В результате оказывается, что масса (в общем случае – матрица инерции) M в формуле (1) оказывается зависящей от частоты. Автор в свое время ввел понятие «динамической инерции» [2] для учета этого эффекта. Этот фактор тоже приводит к тому, что соотношение (1) даже для одномерного движения при использовании в качестве M традиционной массы не выполняется.

Тем не менее, сопоставление типа (1) остается полезным для проверки расчетов, если не требовать точного соответствия правой и левой частей (помня о влиянии двух указанных выше факторов). Разница между правой и левой частями (1) остается в разумных пределах, ощущение которых формируется у расчетчика с опытом.

Проиллюстрируем этот тезис примером из практики. Рассчитываемое сооружение имеет массу 102542 т, примерно прямоугольный фундамент, а его центр тяжести расположен на высоте 16,35 м над подошвой фундамента. В плане центр тяжести сооружения сдвинут относительно геометрического центра прямоугольной подошвы на 0,25 м по оси X и на 0,15 м по оси Y. Все эти данные получены при модальном анализе модели сооружения на защемленном фундаменте в программе ABAQUS [3]. Заглубление сооружения является небольшим (отношение заглубления к эквивалентному радиусу меньше 0,3); что позволяет рассматривать его как

сооружение поверхностного заложения. Накопление относительных модальных масс для сооружения на жестком фундаменте показано на рис.1.

Как видим, первые собственные частоты сооружения на защемленном фундаменте составили 6,2 и 6,8 Гц в двух вертикальных плоскостях. Динамические массы в поступательных направлениях (т.е. диагональные элементы матрицы динамической инерции [1]) показаны на рис.2.

Обратим внимание еще на две «точки проверки». Во-первых, динамические массы по всем направлениям при стремлении частоты к нулю должны стремиться к традиционной массе. Она, как указано выше, составляет около 100 тыс.т, что хорошо согласуется с рис.2. Во-вторых, пики динамических масс (можно ориентироваться на пики мнимых частей) должны располагаться на тех же частотах, что и ступени в графиках накопления модальных масс. Сравнение рис.1 и рис.2 показывает, что и этот критерий выполняется.

Здание расположено на неоднородном по глубине горизонтально-слоистом основании. Расчет проводился согласно требованиям Стандарта ASCE4-98 [4] на трех грунтовых профилях: наряду со средним профилем рассматривались два побочных профиля: «мягкий» и «жесткий» - которые отличались от среднего профиля пропорциональным изменением всех жесткостей в полтора раза соответственно вниз и вверх от средних значений. Средний профиль скоростей

Таблица 1 — Исходное сооружение. Максимальные по модулю ускорения в центре подошвы фундамента для трех грунтовых профилей

Ускорения	x	y	z	xx	yy	zz
m	1,6102E+00	1,4896E+00	1,3268E+00	1,0675E-02	7,6005E-03	4,2908E-03
s	1,6622E+00	1,4099E+00	1,3138E+00	1,3194E-02	1,0048E-02	5,6612E-03
r	1,6840E+00	1,5697E+00	1,3462E+00	8,0046E-03	5,7186E-03	3,0856E-03

ПРОФИЛИ СКОРОСТЕЙ СДВИГОВЫХ ВОЛН

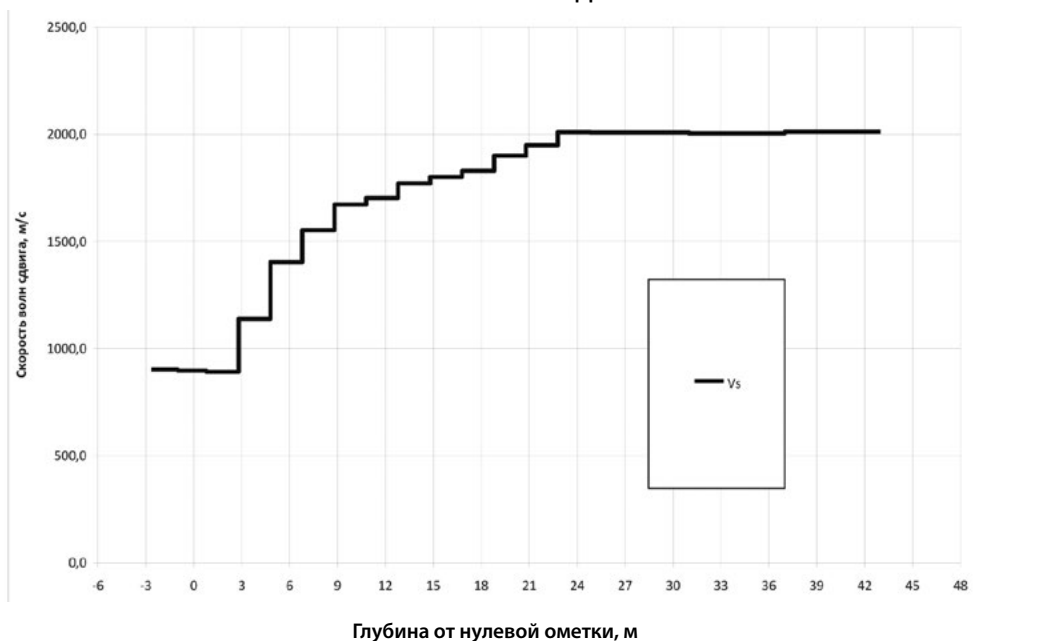


Рисунок 3 — Средний профиль скоростей сдвиговых волн

сдвиговых волн по глубине показан на рис.3.

Сейсмическое воздействие задавалось в виде трехкомпонентной акселерограммы на свободной поверхности основания (в нашем случае – на свободной отметке заложения фундамента). Расчеты, проведенные по КАМ [1], дали реализации во времени шестикомпонентных ускорений подошвы для каждого из трех грунтовых профилей. Максимальные по модулю ускорения в центре подошвы приведены в Таблице 1. Обозначения строк: m – средний грунт, s – мягкий грунт, r – жесткий грунт.

Максимальные по модулю усилия в центре подошвы (в кН и в кН м) приведены в Таблице 2.

Эти данные, повторим, получены в результате работы программ, реализующих КАМ. Наша задача – постараться проверить эти результаты.

Вычислим безразмерные отношения максимальных усилий к неким условным усилиям, имеющим смысл усилий под подошвой для жесткого сооружения, совершающего строго поступательные движения с теми же ускорениями на фундаменте. Для трех поступательных направлений эти условные усилия, очевидно, равны произведению массы на соответствующие максимальные ускорения. Для двух качательных направлений эти условные усилия равны произведению

массы на высоту центра тяжести над подошвой и на поступательные ускорения в той же вертикальной плоскости (для YY – на поступательные ускорения вдоль X, для XX – на поступательные ускорения вдоль Y). Наконец, для кручения в качестве условной массы выберем произведение массы на максимальный момент крутящего ускорения, который мы определим как сумму по правилу ККСК (корень квадратный из суммы квадратов) крутящих моментов, создаваемых максимальными горизонтальными поступательными ускорениями на эксцентриситетах в плане по соответствующим осям. Применение правила ККСК основано на допущении о статистической независимости реакции в двух вертикальных плоскостях. Получившиеся отношения представлены в таблице 3.

Как видим, полученные отношения заметно отличаются от единицы. Является ли это признаком ошибки или же следствием тех двух факторов, о которых говорилось в начале статьи? Для выяснения этого вопроса проделаем два дополнительных расчета с минимальными изменениями модели.

В первом дополнительном расчете ужесточим модель сооружения, чтобы минимизировать влияние податливости верхнего строения на результаты. Сделаем это очень просто – после чтения собственных частот, вычисленных для

Таблица 2 — Исходное сооружение. Максимальные по модулю усилия в центре подошвы фундамента для трех грунтовых профилей

Усилия	x	y	z	xx	yy	zz
m	2,5283E+05	3,1888E+05	1,5393E+05	7,4233E+06	6,7160E+06	1,6642E+06
s	2,5121E+05	3,0766E+05	1,4836E+05	6,9820E+06	6,0051E+06	1,4835E+06
r	2,7723E+05	3,1375E+05	1,5305E+05	7,9348E+06	7,1861E+06	1,9066E+06

Таблица 3 — Исходное сооружение. Безразмерные отношения максимальных по модулю усилий в центре подошвы фундамента к условным усилиям для трех грунтовых профилей

Отношения	x	y	z	xx	yy	zz
m	1,53125	2,08764	1,13140	2,97240	2,48778	36,56371
s	1,47385	2,12805	1,10125	2,95374	2,15485	33,50874
r	1,60545	1,94924	1,10872	3,01509	2,54526	39,84050

Таблица 4 — Ужесточенное сооружение. Максимальные по модулю ускорения в центре подошвы фундамента для трех грунтовых профилей

Ускорения	x	y	z	xx	yy	zz
m	1,9642E+00	2,1284E+00	1,5074E+00	1,0576E-02	7,0281E-03	6,0951E-04
s	1,9647E+00	2,1191E+00	1,4649E+00	1,3555E-02	9,4219E-03	7,7739E-04
r	1,8949E+00	2,0183E+00	1,5206E+00	8,2949E-03	5,8012E-03	3,3274E-04

Таблица 5 — Ужесточенное сооружение. Максимальные по модулю усилия в центре подошвы фундамента для трех грунтовых профилей

Усилия	x	y	z	xx	yy	zz
m	2,0920E+05	2,3266E+05	1,5461E+05	4,2137E+06	3,6731E+06	1,1304E+05
s	2,1050E+05	2,3726E+05	1,5024E+05	4,4615E+06	3,7572E+06	1,1886E+05
r	1,9853E+05	2,1529E+05	1,5593E+05	3,7554E+06	3,3823E+06	9,0787E+04

Таблица 6 — Ужесточенное сооружение. Безразмерные отношения максимальных по модулю усилий в центре подошвы фундамента к условным усилиям для трех грунтовых профилей

Отношения	x	y	z	xx	yy	zz
m	1,03866	1,06602	1,00025	1,18084	1,11539	1,81245
s	1,04485	1,09187	1,00017	1,25577	1,14064	1,91204
r	1,02173	1,04025	1,00003	1,10982	1,06465	1,52880

модели на защемленном фундаменте в программе ABAQUS, просто умножим все эти частоты на 1000. Таким образом, модальный расчет сложной модели не повторяется – изменения происходят после него. Расчет по КАМ производится точно так же, но в результате изменяются как ускорения на фундаменте, так и усилия под подошвой. Результаты представим в таблицах 4...6, аналогичных таблицам 1...3.

Как видно из сравнения Таблицы 6 с Таблицей 3, в безразмерных отношениях произошли серьезные изменения. Для вертикальной реакции (она практически отделяется от остальных реакций из-за небольшого эксцентриситета в

плане, так что фактор податливости верхнего строения является для этой реакции практически единственной причиной отклонения от единицы) отношения практически равны единице; для горизонтальных поступательных реакций разница с единицей оказалась в пределах 10%. Наибольшая разница по-прежнему наблюдается для кручения вокруг вертикальной оси, хотя и она по сравнению с Таблицей 3 снизилась во много раз.

Теперь дополнительно исключим влияние угловых компонент реакции. Сделаем это тоже очень просто – после чтения матрицы импедансов, полученных в программе SASSI

Таблица 7 — Ужесточенное сооружение без поворотов. Максимальные по модулю ускорения в центре подошвы фундамента для трех грунтовых профилей

Ускорения	x	y	z	xx	yy	zz
m	1,9820E+00	2,1560E+00	1,5073E+00	8,4027E-07	6,5488E-07	2,5066E-08
s	2,0372E+00	2,2523E+00	1,4646E+00	1,0481E-06	8,0048E-07	3,6256E-08
r	1,8982E+00	1,9905E+00	1,5205E+00	7,0759E-07	4,9597E-07	1,8489E-08

Таблица 8 — Ужесточенное сооружение без поворотов. Максимальные по модулю усилия в центре подошвы фундамента для трех грунтовых профилей

Усилия	x	y	z	xx	yy	zz
m	2,0319E+05	2,2103E+05	1,5456E+05	3,6108E+06	3,3204E+06	6,1911E+04
s	2,0888E+05	2,3097E+05	1,5015E+05	3,7725E+06	3,4088E+06	6,5746E+04
r	1,9468E+05	2,0410E+05	1,5593E+05	3,3341E+06	3,1783E+06	5,8152E+04

Таблица 9 — Ужесточенное сооружение без поворотов. Безразмерные отношения максимальных по модулю усилий в центре подошвы фундамента к условным усилиям для трех грунтовых профилей

Отношения	x	y	z	xx	yy	zz
m	0,99976	0,99977	0,99999	0,99893	0,99923	0,98084
s	0,99991	1,00006	0,99978	0,99904	0,99804	1,00080
r	1,00018	0,99995	1,00010	0,99907	0,99870	0,98915

[5], просто умножим диагональные элементы (4,4), (5,5) и (6,6) на 10000. Таким образом, громоздкий расчет по SASSI повторять не надо. Расчет по КАМ производится точно так же, но в результате снова изменяются как ускорения на фундаменте, так и усилия под подошвой. Результаты представим в таблицах 7...9, аналогичных таблицам 1...3 и 4...6.

Прежде всего, обратим внимание на последние три столбца Таблицы 7. Максимальные угловые ускорения уменьшились по сравнению с Таблицей 4 на четыре порядка – т.е. повороты действительно практически исключены в результате примененного масштабирования элементов матрицы импедансов в 10000 раз. Это средство самопроверки, которая никогда не бывает лишней. Но главный результат – в Таблице 9. Все отношения с хорошей точностью равны единице – даже для кручения (см. последний столбец), где примененное правило ККСК имеет статистический смысл. Отсюда можно сделать вывод о том, что наблюдавшиеся ранее в Таблице 3 отклонения безразмерных отношений от единицы являются не следствием ошибок, а следствием указанных двух факторов, а сами эти отклонения находятся в разумных пределах.

Интересно посмотреть на то, как изменились в описанных выше дополнительных расчетах не просто максималь-

ные ускорения на подошве фундамента, а спектры ответа. В качестве примера на рис.4 приведены спектры ответа по оси Y с демпфированием 5% для среднего грунтового профиля, полученные в исходном расчете и в двух дополнительных расчетах, в сравнении со спектром ускорений воздействия по оси Y, заданного на свободной поверхности основания.

На этом рисунке хорошо виден еще один важный этап верификации расчетов: на малых частотах (в нашем случае – примерно до 3 Гц) все поступательные спектры должны хорошо совпадать между собой. Физически это требование соответствует воспроизведению картины медленного поступательного смещения основания вместе с сооружением. Ни податливость верхнего строения, ни повороты до определенной частоты не портят этого совпадения спектров.

Теперь о том соотношении спектров, которое проявляется при частотах выше примерно 3 Гц. Податливость верхнего строения проявилась на частотах около 5 Гц, где спектры усилились (это первая частота податливого сооружения на рассматриваемом основании). При дальнейшем увеличении частоты доминирующая форма (см. рис.1) перешла в закритический режим, т.е. реакция по ней оказалась в противофазе с воздействием. Вслед за диапазоном частот, в котором учет податливости ведет к повышению колебаний

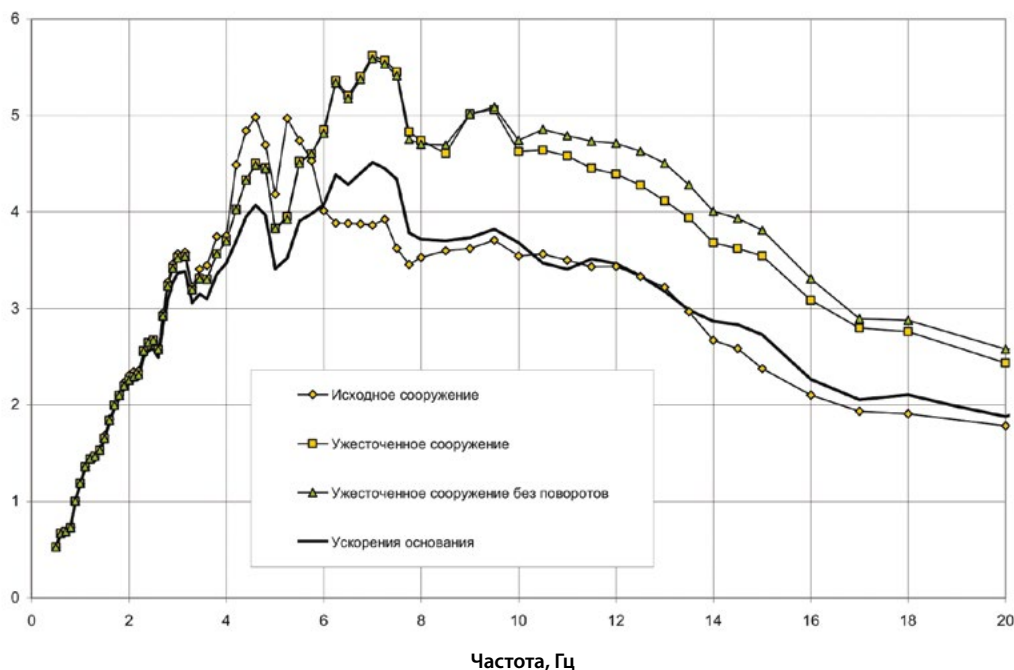


Рисунок 4 — Сравнение спектров ускорений в центре подошвы жесткого фундамента вдоль оси Y для среднего грунтового профиля. Демпфирование в осцилляторах 5%

фундамента по сравнению с воздействием, следует диапазон частот, в котором учет податливости ведет к понижению спектра по сравнению с воздействием. Это типичное явление. В результате после перехода через доминантную частоту соответствующая динамическая масса резко уменьшилась (см. рис.2), и при дальнейшем повышении частоты реакция фундамента стала близкой к воздействию на свободной поверхности.

Если же сооружение ужесточить, никаких закритических эффектов в рассматриваемом диапазоне частот не будет. Первая собственная частота жесткого сооружения без поворотов на рассматриваемом основании составляет около 12,0 Гц, а с разрешенными поворотами она составляет 11,5 Гц. Как мы видим, влияние поворотов в данном случае оказалось невелико, - это проявляется и на рис.4.

На самом деле, данная статья появилась в результате реальных расчетов, в ходе которых автором была допущена ошибка. Позже выяснилось, что уже после модальных расчетов модели сооружения на защемленном фундаменте в программе ABAQUS при сведении вместе результатов ABAQUS с результатами SASSI (в отдельной программе) в жесткие инерционные характеристики сооружения была добавлена (точнее, осталась от предыдущего расчета другого сооружения, т.е. не была убрана) инерция бетонной подготовки под фундаментной плитой. Этой подготовки в данном сооружении не должно было быть. В результате этой ошибки масса сооружения в дальнейших расчетах по КАМ увеличилась на 80% по отношению к правильной массе, и соответствующие отношения в Таблице 3 тоже увеличились (в первых двух столбцах – примерно до 4,0). Принципиально важно то, что при вычислении отношений для Таблицы 3 использовалась та масса, которая выдается программой ABAQUS (т.е. правильная масса, до появления ошибки). Два дополнительных расчета, проведенные по описанной выше схеме, показали, что даже

в Таблице 9 отношения не вышли на единицу. Это стало индикатором наличия ошибки. После этого автор проверил передаточные функции от колебаний свободной поверхности к силам под подошвой. Эти функции при малой частоте должны по всем грунтам и по всем поступательным направлениям «выходить» на массу сооружения. Они и «вышли» на одно и то же значение эффективной массы, но сама эта масса оказалась неправильной по сравнению с массой, вычисленной в программе ABAQUS. Дальше автор еще раз проверил текст своей программы, сводящей вместе результаты вычислений по программам ABAQUS и SASSI, где и обнаружил указанную выше ошибку. После ее исправления были получены правильные результаты, представленные выше.

Автор считает эту историю поучительным примером верификации результатов расчета и надеется, что она может оказаться полезной коллегам. Еще раз суммируем выводы.

1. Комбинированный асимптотический метод (КАМ) предоставляет ряд возможностей для верификации результатов. Одной из таких возможностей является сравнение максимальных ускорений на жесткой подошве фундамента и максимальных интегральных усилий под этой подошвой.
2. Безразмерные отношения вычисленных усилий к условным усилиям, вычисляемым по максимальным ускорениям и инерционным характеристикам, сравниваются с единицей. Точного равенства в исходном расчете ожидать не следует – из-за влияния податливости верхнего строения и влияния угловых компонент реакции фундамента. Однако для горизонтальных поступательных направлений отношения для рассмотренного примера (и других примеров из практики автора) не должны превышать примерно двух; для вертикального направления – примерно полутора. По качанию эти отношения не должны превышать примерно трех.

3. Если отношения в исходном расчете существенно выходят за указанные выше пределы, автор рекомендует провести дополнительную проверку по алгоритму, приведенному в настоящей статье. Процедура проверки не занимает много времени: расчеты по КАМ дополнительно повторяются дважды, но при этом модальные расчеты верхнего строения и расчеты импедансов повторять не надо. Безразмерные отношения, по которым проводится

сопоставление, вычисляются очень просто, например, в EXCEL.

4. Дополнительной проверкой служит сравнение спектров поступательных ускорений воздействия на свободной поверхности основания и спектров ответа на фундаменте для всех рассмотренных вариантов моделей сооружения. На малых частотах они должны совпадать.

Литература

1. Тяпин А.Г. Учет взаимодействия сооружений с основанием при расчетах на сейсмические воздействия. Руководство по расчетам. М.: Издательство АСВ. 2014. 136 с.
2. Тяпин А.Г., Попрыгин Д.В. Динамическая инерция в расчетах на сейсмические воздействия сооружения с жестким фундаментом

на грунтовом основании // Строительная механика и расчет сооружений. 2008. №2. С.71-76.

3. ABAQUS. Version 6.8. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA. 2008.

4. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary. ASCE4-98. Reston, Virginia, USA. 1999.

5. Lysmer J., Tabatabaie R.M., Tajirian F., Vahdani S., Ostadan F. SASSI - A System for Analysis of Soil-Structure Interaction. Research Report GT 81-02. University of California, Berkeley. 1981.

Материалы хранятся по адресу:
105005, г. Москва, Бакунинская ул., 7, стр.
(АО «Атомэнергопроект»)
тел.: (499)267-35-03, e-mail: atyapin@bvcpr

TYAPIN A., D. Sc., JSC "Atomenergoproject", Moscow

COMPARISON OF MAXIMAL INTEGRAL FORCES UNDER THE BASE WITH MAXIMAL RIGID BASE ACCELERATIONS AS A TOOL FOR VERIFICATION OF SEISMIC ANALYSIS

Abstract

Development of verification tools for seismic SSI analysis is discussed in the paper. Combined asymptotic method (CAM) enables verification in different stages of analysis. Particular example of localization of an error is presented in the paper, using the comparison of maximal force under the base and maximal rigid base accelerations calculated by CAM. Two factors spoil the simple link between forces and acceleration based on the second Newton's law. The first factor is the flexibility of the upper structure. The second factor is the rotational components of the response (without rotational components in seismic excitation). The author suggests the calculation of simple dimensionless ratios between forces, accelerations and masses after CAM calculations. For 1D rigid body motions these ratios

are unit. For real structure these ratios are different due to the two abovementioned factors. However, this difference should stay reasonable. If there are any doubts, the author suggests additional CAM calculations without flexibility and rotations. Time-consuming modal analysis of fixed-base structure and calculation of impedances are not repeated, so the additional calculations are very fast and simple. If after excluding flexibility and rotations the ratios do not come to unit, the analyst should look for a mistake. The additional verification tool is a comparison of response spectra for all the variants with excitation spectra. Translational spectra for low frequencies must be almost similar.

Keywords: seismic response, soil-structure interaction, verification tools for dynamic analysis, combined asymptotic method.

References

1. Tyapin A.G. Uchet vzaimodeistviia sooruzhenii s osnovaniem pri raschetah na seismicheskie vozdeistviia. Rukovodstvo po raschetam [Seismic analysis of structures considering soil-structure interaction. Manual for analysis]. Moscow: ASV, 2014. 136 p. (In Russian).
2. Tyapin A.G., Poprygin D.V. Dinamicheskaia in-

ertsiia v raschetah na seismicheskie vozdeistviia sooruzheniia s zhestkim fundamentom na gruntovom osnovanii [Dynamic inertia in seismic analysis of rigid base structures considering soil-structure interaction]. *Stroitel'naiia mekhanika i raschet sooruzhenii* [Structural Mechanics and Analysis of Structures]. 2008. No.2. Pp. 71-76. (In Russian).
3. ABAQUS. Version 6.8. Dassault Systèmes Sim-

ulia Corp., Providence, RI, USA. 2008.

4. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary. ASCE4-98. Reston, Virginia, USA. 1999.

5. Lysmer J., Tabatabaie R.M., Tajirian F., Vahdani S., Ostadan F. SASSI - A System for Analysis of Soil-Structure Interaction. Research Report GT 81-02. University of California, Berkeley. 1981.

Для цитирования: Тяпин А.Г. Сопоставление максимальных интегральных усилий под подошвой и максимальных ускорений жесткого фундамента как средство проверки расчетов на сейсмические воздействия // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 2. С. 26-33.

For citation: Tyapin A.G. Comparison of maximal integral forces under the base with maximal rigid base accelerations as a tool for verification of seismic analysis. *Seismostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake engineering. Constructions safety], 2018, no. 2, pp. 26-33. (In Russian).