

А. Г. ТЯПИН
доктор технических наук

А. С. ТОПОРКОВ
ведущий инженер

АО «Атомэнергoproject», г. Москва

УДК 624.042.7

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО АСИМПТОТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ УСИЛИЙ В СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ: ЛИНЕЙНО-СПЕКТРАЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

В статье обсуждаются результаты тестирования новых возможностей программы СКАД по линейно-спектральному расчету усилий в соответствии с требованиями норм атомной отрасли. Для сравнения используются результаты модельного расчета по программе АБАКУС и результаты расчета в частотном диапазоне с использованием Быстрого Преобразования Фурье. Проверяются одномодальные реакции на однокомпонентное воздействие (включая вращательные компоненты воздействия), суммирование одномодальных сейсмических реакций на однокомпонентные воздействия (включая использование остаточного члена), а также суммирование «однокомпонентных» реакций при оценке реакции на шестикомпонентное воздействие, заданное на жестком фундаменте. Это воздействие вычислено комбинированным асимптотическим методом с учетом взаимодействия сооружения с грунтовым основанием. Результаты сравнения показывают недопустимое занижение вертикальных усилий при использовании в расчете правил суммирования из гражданских норм (в отличие от атомных норм).

Ключевые слова: сейсмическая реакция, линейно-спектральный расчет, расчет в частотном диапазоне, суммирование максимальных реакций.

В прошлой публикации на эту тему [1] рассматривалось соотношение максимальных реакций (в формате внутренних усилий) на однокомпонентные воздействия по шести степеням свободы, с одной стороны, и шестикомпонентное воздействие, с другой стороны. Все расчеты велись в частотном диапазоне с применением преобразования Фурье, что позволяло получать реализации реакций во времени и определять максимумы их модулей.

Однако на практике усилия рассчитываются по линейно-спектральной теории. В АЭП для этих целей используется программа СКАД [2], в новых версиях которой предусмотрен расчет на шестикомпонентное воздействие (включая угловые компоненты), а также учет некоторых других специфических требований атомных норм [3]. В частности, речь идет об использовании остаточного члена и о специальных правилах суммирования одномодальных реакций на однокомпонентные воздействия, о которых автор писал в [4, 5]. Отсутствие таких опций долгое время сдерживало, в частности, внедрение комбинированного асимптотического метода в практику расчета усилий – тогда как в практику расчета поэтажных спектров этот метод внедрен уже давно.

Целью настоящей статьи является тестирование указанных выше новых опций программы СКАД путем сравнения

результатов, полученных по программе СКАД, с результатами расчета в частотном диапазоне, а также с аналитическими результатами, полученными для «одномодальной» реакции, т.е. реакции по одной выделенной доминантной форме на воздействие по выделенному направлению (для разных направлений воздействия эта форма разная, см. ниже). Смысл такого сравнения – в верификации результатов СКАД.

Рассматривалось то же здание, что и в [1], но его параметры по сравнению с [1] несколько изменились. Модель сооружения на защемленном фундаменте изначально строилась в программе АБАКУС [6], а затем переносилась в программу СКАД. Из-за различий в методологии перенос нельзя назвать тождественным, но первые формы с точки зрения коэффициентов участия воспроизведены достаточно адекватно.

На рис.1 показано накопление относительных модальных масс по шести степеням свободы по результатам модального анализа, проведенного в программе АБАКУС.

Мы видим, что первые частоты горизонтально-качательных форм составили 6,3364 (в [1] было 6,24) Гц в плоскости OYZ и 6,8113 (в [1] было 6,83) Гц в плоскости OXZ. Соответствующие формы являются доминирующими с точки зрения модальных масс.

Обратим внимание на то, как отличается накопление модальных масс в вертикальном направлении Z от всех других направлений, – на частоте 15 Гц накоплено всего около 35% общей массы. Кроме того, если по всем другим пяти направлениям четко видна одна большая «ступенька», соответствующая доминирующей форме, то по вертикальному направлению таких «ступенек» несколько, и высота их сравнительно невелика. Это замечание мы вспомним ниже.

Несмотря на некоторые изменения в конструкции сооружения, воздействие на жестком фундаменте в настоящей

работе было оставлено таким же, как в [1]. Напомним, что шесть компонент этого воздействия синтезировались под огибающие спектры, вычисленные для однотипных зданий на двенадцати разных грунтовых основаниях. Эти компоненты статистически независимы между собой (коэффициенты попарной корреляции находятся в пределах 0,15). Спектры ответа для шести компонент этого сейсмического воздействия, построенные для демпфирования в осцилляторах 7%, приведены на рис. 2 и 3 соответственно для поступательных и для вращательных компонент.

На первом этапе работы тестировались расчеты по линейно-спектральной теории т.н. «одномодальной» реакции на однокомпонентные воздействия. С одной стороны, соответствующие реакции вычислялись в программе СКАД и выводились из протоколов расчета. С другой стороны, были проведены еще и ручные расчеты. Для этого, исходя из коэффициентов участия, выбиралась одна форма, которая считалась доминирующей в выбранном направлении. Для направлений Y и XX (т.е. для вертикальной плоскости OYZ) доминирующей, как отмечено выше, была признана первая форма колебаний, для направлений X и YY (т.е. для вертикальной плоскости OXZ) – вторая форма колебаний.

Для каждой компоненты воздействия вычислялось спектральное ускорение на соответствующей «доминантной» частоте (простой интерполяцией спектров с рис. 4 и 5). Затем это ускорение умножалось на модули двух коэффициентов участия соответствующей формы в двух выбранных направлениях (т.е. в направлении воздействия и в направлении реакции). Все модальные данные (как по частотам, так и по коэффициентам участия) для ручных вычислений принимались по результатам расчета в программе АБАКУС (там формы нормировались по массе).

Поясним сказанное на нашем конкретном примере. Рассмотрим воздействие вдоль оси Y. Ему соответствует, как от-

НАКОПЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ МОДАЛЬНЫХ МАСС

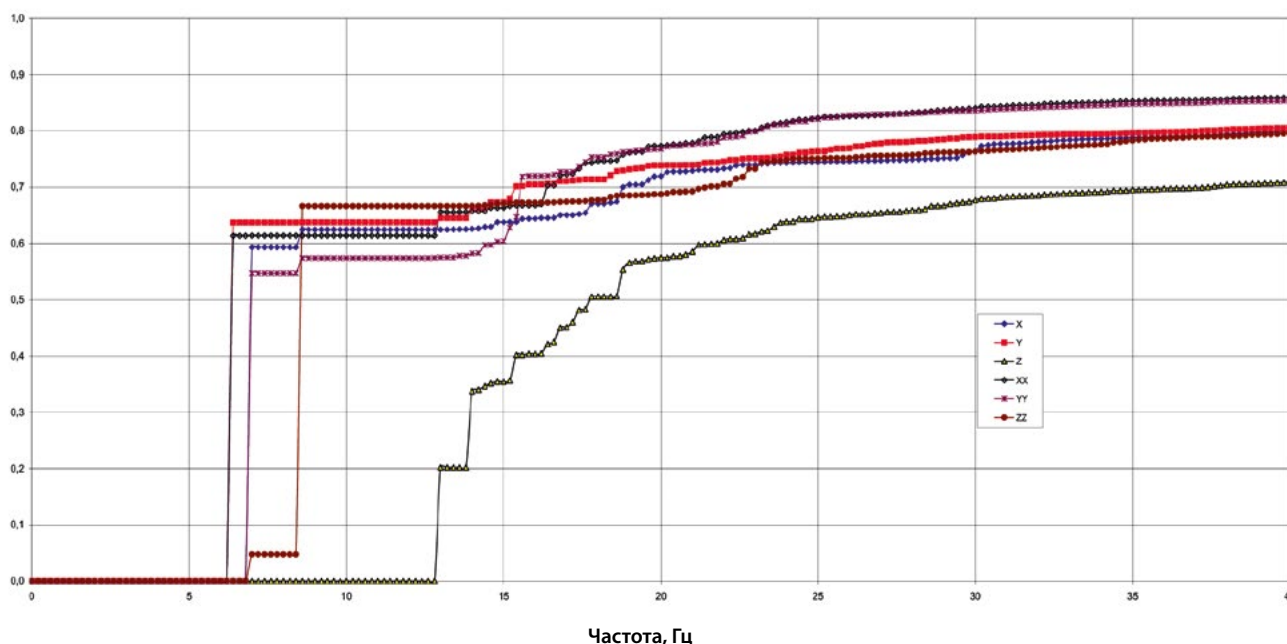


Рисунок 1 — Накопление относительных модальных масс по шести степеням свободы

ПОСТУПАТЕЛЬНЫЕ СПЕКТРЫ 7%

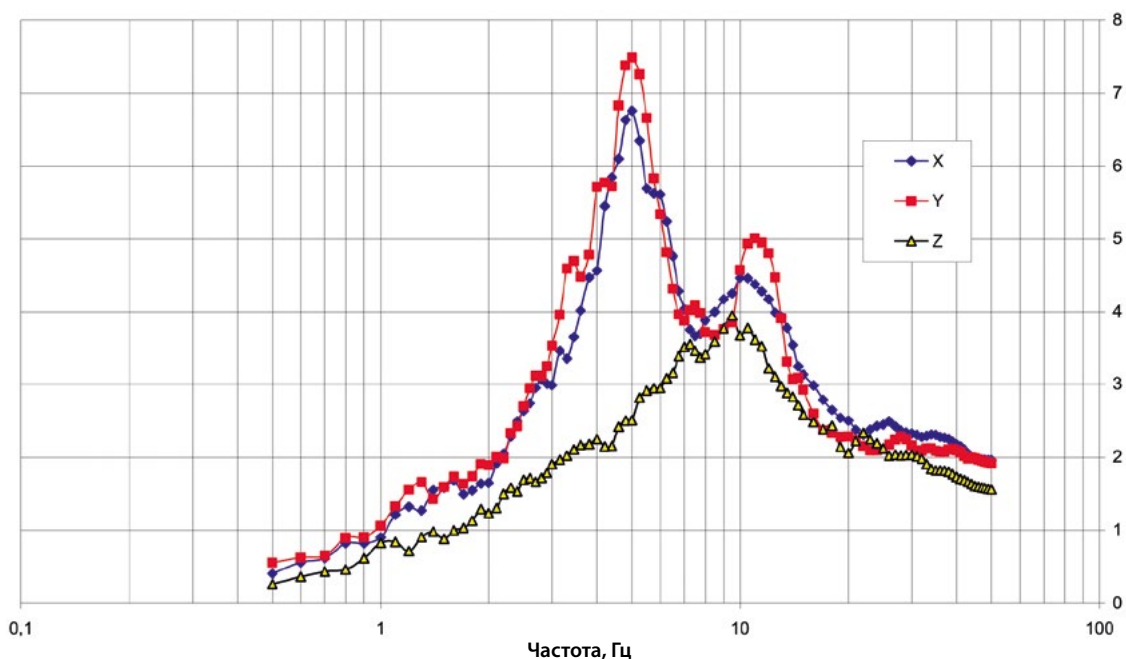


Рисунок 2 — Спектры ответа для поступательных компонент реакции жесткого фундамента

ВРАЩАТЕЛЬНЫЕ СПЕКТРЫ 7%

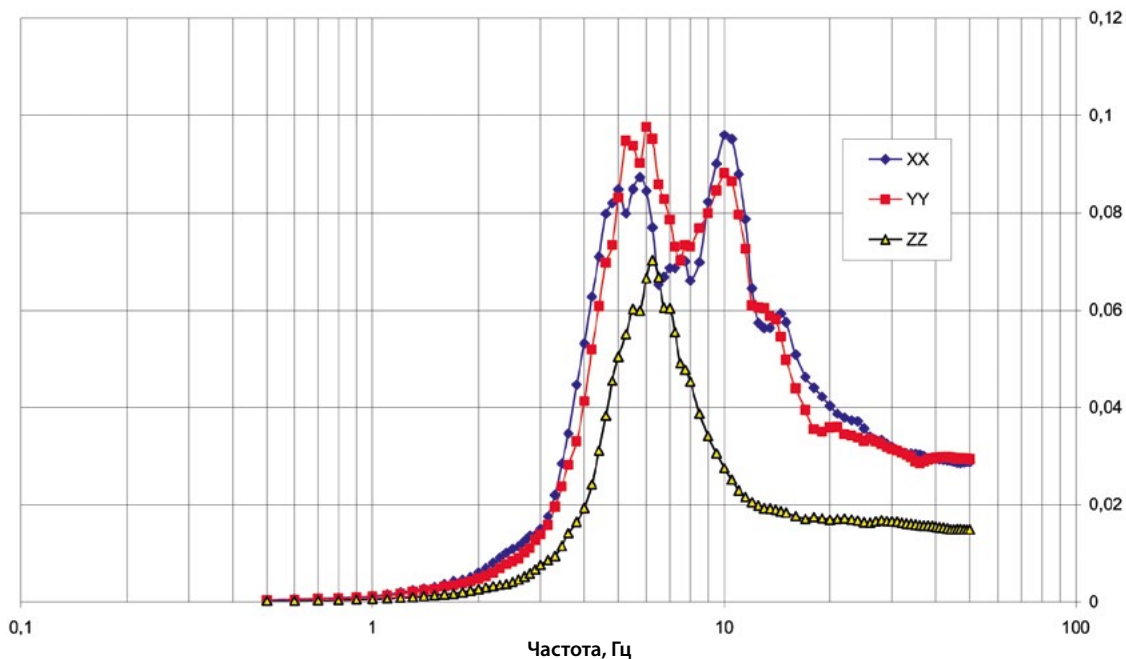


Рисунок 3 — Спектры ответа для вращательных компонент реакции жесткого фундамента

мечено выше, доминирующая собственная форма с частотой 6,3364 Гц. Соответствующие коэффициенты участия для этой формы равны: по Y $257,73 (\text{т})^{0,5}$, по XX (т.е. при вращении вокруг оси OX) $-6752,4 (\text{т м}^2)^{0,5}$. Интерполяция спектров дает на этой частоте спектральное ускорение по Y, равное $4,649 \text{ м/с}^2$, а также ускорение по XX, равное $0,073 \text{ радиан/с}^2$. Для оценки «одномодальной» интегральной реакции по направлению Y от однокомпонентного воздействия по направлению Y мы

должны умножить квадрат соответствующего коэффициента участия (он, кстати, равен модальной массе по направлению Y) на спектральное ускорение воздействия. Получим $257,73^2 \times 4,649 = 3,09 \times 10^5 \text{ кН}$. Для определения интегрального момента XX от воздействия по направлению Y мы должны умножить модули соответствующих коэффициентов участия на то же самое спектральное ускорение. Получим $257,73 \times 6752,4 \times 4,649 = 8,09 \times 10^6 \text{ кН м}$.

Таблица 1 — Максимальные по времени модули интегральных усилий над фундаментной плитой при учете одной формы и однокомпонентных воздействиях в вертикальной плоскости OYZ

Воздействие	Способ расчета	Частота, Гц	Спектральное ускорение	Реакция по у, кН	Реакция по хх, кН м
Y	Спектральный расчет (СКАД)	6,3273	4,657	3,09E+05	8,32E+06
	«Одномодальная» реакция	6,3364	4,649	3,09E+05	8,09E+06
XX	Спектральный расчет (СКАД)	6,3273	0,0731	1,31E+05	3,52E+06
	«Одномодальная» реакция	6,3364	0,0731	1,27E+05	3,33E+06

Таблица 2 — Максимальные по времени модули интегральных усилий над фундаментной плитой при учете одной формы и однокомпонентных воздействиях в вертикальной плоскости OXZ

Воздействие	Способ расчета	Частота, Гц	Спектральное ускорение	Реакция по у, кН	Реакция по хх, кН м
Y	Спектральный расчет (СКАД)	6,7999	4,2318	2,62E+05	7,21E+06
	«Одномодальная» реакция	6,8113	4,2208	2,61E+05	7,01E+06
XX	Спектральный расчет (СКАД)	6,7999	0,0820	1,40E+05	3,85E+06
	«Одномодальная» реакция	6,8113	0,0818	1,36E+05	3,65E+06

При расчете «одномодальной» реакции на однокомпонентное воздействие, приложенное в направлении XX, будет использоваться та же форма с теми же коэффициентами участия. Но в качестве спектрального ускорения выступит угловое ускорение (на той же собственной частоте) 0,073 радиан/с², поэтому реакция по направлению Y будет равна $257,73 \times 6752,4 \times 0,073 = 1,27 \times 10^5$ кН, а реакция в направлении XX будет равна $6752,4^2 \times 0,073 = 3,33 \times 10^6$ кН м.

В Таблице 1 приведены максимальные по времени модули интегральных усилий над фундаментной плитой для однокомпонентных воздействий в вертикальной плоскости OYZ, полученные расчетом по программе СКАД с оставлением одной доминирующей формы (программа СКАД позволяет выводить реакции отдельно по формам), а также по «одномодальным» аналитическим формулам, как описано выше. Реакции в разных направлениях показаны по столбцам, воздействия и способы расчета – по строкам. Оставлены только два самых значимых направления воздействия и реакции из шести – это направления Y и XX.

Как видим, в целом соответствие результатов двух методов расчета неплохое, хотя спектральный расчет показал небольшой консерватизм по сравнению с расчетом в ручном режиме. При полном совпадении моделей разницы быть не должно. Таким образом, небольшая разница в результатах объясняется разницей в моделях сооружения между моделью АБАКУС (из нее брались коэффициенты участия формы для ручного расчета), и моделью того же сооружения в про-

грамме СКАД. Можно говорить и о небольшом влиянии разницы в интерполяции при получении спектральных ускорений: в программе СКАД интерполяция проводится по оси периодов, при ручном расчете применялась интерполяция по частотам.

Приведем аналогичную таблицу для вертикальной плоскости OXZ. Для «одномодальной» реакции здесь используется вторая форма. Коэффициенты участия для нее, по данным расчета АБАКУС, равны $248,72 (\tau)^{0,5}$ по X и $6683,4 (\tau \text{ м}^2)^{0,5}$ по YY. Спектральные ускорения на частоте 6,81 Гц составляют $4,22 \text{ м/с}^2$ по X и $0,0818$ радиан/с² по YY.

В целом сделанные ранее выводы остаются в силе. Кроме того, можно заключить, что программа СКАД дает разумные «одномодальные» результаты не только при поступательных воздействиях (что традиционно использовалось уже в течение многих лет), но и при качательных воздействиях (что для этой программы является новой опцией). Отметим, что самое хорошее совпадение отмечено при поступательных воздействиях и реакциях, а при качании совпадение ухудшается. Возможно, это связано с ограничениями при моделировании инерции в программе СКАД – судя по всему, поступательные коэффициенты участия для доминирующих форм в моделях АБАКУС и СКАД совпадают лучше, чем качательные коэффициенты участия для тех же форм.

Проверим и вертикальную реакцию. По данным АБАКУС, первая доминирующая форма в вертикальном направлении имеет частоту 12,843 Гц, по данным СКАД – 12,868 Гц.

Соответственно вертикальное спектральное ускорение на этой собственной частоте согласно рис. 2, по данным АБАКУСа, составляет $3,0182 \text{ м/с}^2$, а по данным СКАД оно равно $3,0107 \text{ м/с}^2$. Коэффициент участия этой формы в вертикальном направлении, по данным АБАКУСа, равен $145 (\tau)^{0.5}$, так что «одномодальная» спектральная реакция составит $145^2 \times 3,0182 = 6,346 \times 10^4 \text{ кН}$. По данным СКАД, она составляет $5,95 \times 10^4 \text{ кН}$. Как видим, разница по сравнению с горизонтальными направлениями заметно возросла и составила около 6%; поскольку спектральные ускорения, как мы видели выше, различаются незначительно, вся эта разница возникла за счет разницы в моделях.

Теперь перейдем к следующей части тестирования – проверке суммирования одномодальных реакций при расчете общей реакции, но пока на однокомпонентное воздействие. Здесь пока у авторов СКАД недоработка – они сначала суммируют реакции по одной форме на все компоненты воздействия, и только затем суммируют реакции по разным формам. Атомные же нормы предписывают другой порядок: сначала надо суммировать реакции по разным формам на одну компоненту воздействия, и только затем суммировать «однокомпонентные» реакции. Понятно, что когда и при одном, и при другом суммировании (т.е. при суммировании реакций по разным формам, с одной стороны, и на разные компоненты воздействия, с другой стороны) используется правило «квадратный корень из суммы квадратов» (ККСК), порядок суммирования не влияет на результаты. Действительно, от перемены мест слагаемых под корнем сумма не меняется. Однако атомные нормы (да и гражданские нормы последнего поколения) предписывают отказ от правила ККСК в некоторых случаях при суммировании реакций по разным формам на однокомпонентные воздействия. В гражданских нормах отклонения от ККСК предписываются при близких собственных частотах [7]. В атомных нормах по-другому проводится расчет для близких частот [4] и дополнительно предусмотрено специальное правило суммирования для высоких собственных частот по сравнению с несущими частотами воздействия [5]. В этих условиях порядок суммирования уже влияет на результаты. Тем более это важно, если учесть, что остаточные члены, трактуемые как дополнительные формы, являются разными для разных направлений воздействия [5].

По отношению к результатам СКАД сравнивалось две опции. Во-первых, был проведен расчет без учета остаточного члена с удержанием форм с частотами до $50,3762 \text{ Гц}$ (таких форм для нашего сооружения набралось 640). Суммирование «одномодальных» реакций в этом случае было проведено вручную по «правилу 10%», реализованному в гражданских нормах [7]: если две собственные частоты различаются менее чем на 10%, то вместо суммы квадратов соответствующих реакций берется квадрат суммы модулей. Корреляция реакций по высокочастотным формам не учитывалась, как и положено по современным гражданским нормам.

Вторая опция СКАД – суммирование одномодальных реакций по атомным нормам [3]. Чтобы провести тестирование СКАД с этой опцией при однокомпонентных воздействиях при отмеченном выше неверном порядке суммирования, авторам пришлось использовать искусственный прием: задавалось шестикомпонентное воздействие, но пять ком-

понент из шести искусственно занижались на несколько порядков. Таким образом, указанный выше недостаток как бы нивелировался. В данном случае удерживались формы с собственными частотами всего до $22,466 \text{ Гц}$ (таких форм было 69), но зато использовался остаточный член, который приближенно учел реакцию по всем остальным отброшенным формам.

Результаты указанных двух опций СКАД сравнивались с результатами расчета реакций на однокомпонентные воздействия в частотном диапазоне. Расчет в частотном диапазоне интегральных усилий над фундаментной плитой проводился точно так же, как в [1], – умножением матрицы динамической инерции на воздействие на фундаменте (при этом матрица инерции полного сооружения была скорректирована на инерцию жесткой фундаментной плиты). Матрица динамической инерции, как и в [1], была построена по методике [4]. При этом демпфирование в железобетоне задавалось равным 7%. При построении матриц учитывались первые 605 форм, частоты которых не превышают $51,132 \text{ Гц}$. Как видим, в АБАКУСе в том же частотном диапазоне оказалось заметно меньше собственных частот, чем в СКАДе (605 против 640), – это еще одно свидетельство разницы в моделях.

Как и в [1], в частотном диапазоне отдельно вычислялась реакция на шесть компонент, приложенных одновременно, а также на каждую из этих компонент, приложенную по отдельности. В Таблице 3 приведено сравнение результатов двух опций СКАД и расчета в частотном диапазоне.

Для удобства анализа в Таблице 3 цветом выделены «доминантные» реакции при каждом однокомпонентном воздействии. Совпадение результатов достаточно разумное, но есть одно явное исключение. Если посмотреть на реакцию в вертикальном направлении от вертикального воздействия, то окажется, что традиционный расчет без учета остаточного члена (в нашем случае СКАД 50 Гц) занижает ее практически в два с половиной раза по сравнению с «эталонным» расчетом в прямом времени.

По мнению авторов, такое недопустимое занижение реакции объясняется неучетом в гражданских нормах корреляции, имеющейся в одномодальных реакциях по высокочастотным формам. Природу это эффекта один из авторов уже разъяснял в [5]. На рис.2 ясно видно, что несущая частота воздействия по вертикальному направлению в нашем случае составляет около 10 Гц . Для всех форм с собственными частотами 15 Гц и выше (а их общая модальная масса согласно рис.1 составляет 65% от общей массы) воздействие с такой частотой является сравнительно низкочастотным. Это означает, что реакция по этим формам будет квазистатической, т.е. происходить в фазе с воздействием. Но воздействие одно, а форм много – в результате реакции по всем этим формам окажутся в фазе друг с другом, хотя частоты этих форм могут различаться больше чем на 10%. Согласно гражданским нормам, при суммировании таких реакций должно применяться правило ККСК, согласно атомным нормам – суммирование по модулю. Разницу легко понять на простом примере. Пусть суммируются десять единичных слагаемых. Суммирование по модулю даст результат 10, а суммирование по правилу ККСК даст результат корень квадратный из десяти, т.е. 3,16.

Таблица 3 — Результаты расчета интегральных усилий над подошвой при однокомпонентном воздействии

Воздействие	Расчет	x	y	z	xx	yy	zz
X	СКАД (50 Гц)	2,75E+05	1,33E+04	1,27E+04	3,63E+05	7,57E+06	3,62E+06
	СКАД (20 Гц)	3,04E+05	4,20E+03	3,02E+03	1,18E+05	7,28E+06	2,11E+06
	Частотный диапазон	2,94E+05	3,62E+03	3,45E+03	1,30E+05	7,30E+06	1,47E+06
Y	СКАД (50 Гц)	1,22E+04	3,10E+05	2,56E+04	8,33E+06	4,29E+05	2,51E+05
	СКАД (20 Гц)	3,85E+03	3,36E+05	1,02E+04	8,28E+06	1,10E+05	1,86E+05
	Частотный диапазон	2,80E+03	3,40E+05	8,91E+03	8,13E+06	7,87E+04	1,53E+05
Z	СКАД (50 Гц)	1,09E+04	2,14E+04	7,69E+04	7,93E+05	4,40E+05	1,55E+05
	СКАД (20 Гц)	2,42E+03	6,73E+03	2,42E+05	5,06E+05	1,90E+05	2,58E+04
	Частотный диапазон	3,00E+03	7,89E+03	1,83E+05	5,48E+05	2,39E+05	3,85E+04
XX	СКАД (50 Гц)	5,62E+03	1,31E+05	1,50E+04	3,53E+06	1,68E+05	1,25E+05
	СКАД (20 Гц)	1,78E+03	1,31E+05	1,06E+04	3,64E+06	7,55E+04	8,54E+04
	Частотный диапазон	1,72E+03	1,31E+05	1,07E+04	3,81E+06	5,29E+04	7,81E+04
YY	СКАД (50 Гц)	1,47E+05	8,11E+03	8,22E+03	1,89E+05	4,05E+06	1,90E+06
	СКАД (20 Гц)	1,41E+05	2,21E+03	4,07E+03	8,24E+04	4,12E+06	1,13E+06
	Частотный диапазон	1,45E+05	2,06E+03	4,41E+03	6,07E+04	4,46E+06	1,00E+06
ZZ	СКАД (50 Гц)	4,44E+04	3,21E+03	1,17E+03	8,85E+04	1,21E+06	2,08E+06
	СКАД (20 Гц)	2,87E+04	2,64E+03	4,49E+02	6,93E+04	7,85E+05	1,95E+06
	Частотный диапазон	2,83E+04	2,51E+03	2,03E+02	6,74E+04	7,80E+05	2,27E+06

Читатель может спросить, почему такой же эффект не проявлялся для горизонтально-качательных колебаний. Ответ кроется в рис. 1 – для всех направлений, кроме вертикального, в высокочастотной по отношению к воздействию области (начиная примерно с 8 Гц) находятся собственные формы с модальной массой порядка 40% общей массы. Реакция в целом, как показывает сравнение Таблицы 3 с Таблицами 1 и 2, определяется одной низкочастотной доминантной формой, а для нее СКАД, как мы видели выше, дает разумные результаты.

Вернемся к Таблице 3. Если говорить о «недоминантных» реакциях, порожденных несимметрией сооружения, то в нашем случае выделяется связь между кручением (ZZ) и горизонтально-качательными колебаниями в плоскости OXZ.

В целом вывод из второй части такой – СКАД дает разумные результаты при расчетах на однокомпонентные воздействия, включая угловые. Использование остаточного члена

и «атомных» правил суммирования одномодальных реакций позволяет практически на порядок снизить число учитываемых форм. При этом точность результатов не только не уменьшается, но даже немного возрастает. Понятно, почему авторы атомных норм так настаивали на применении остаточного члена. Особняком стоит вертикальная реакция на вертикальное воздействие. Отсутствие остаточного члена и неучет корреляции одномодальных реакции по высокочастотным формам в нашем случае делает результат расчета просто недостоверным, причем в сторону занижения усилий. В то же время применение правила суммирования из атомных норм ASCE4-98 делает результат разумным и в этом случае.

Теперь перейдем к третьей части работы – к вопросу о суммировании реакций на однокомпонентные воздействия для получения реакции на шестикомпонентное воздействие. Этот вопрос применительно к расчетам в частотном

Таблица 4 — Результаты расчета интегральных усилий над подошвой при шестикомпонентном воздействии

Расчет	x	y	z	xx	yy	zz
СКАД (50 Гц)	3,18E+05	3,37E+05	8,45E+04	9,09E+06	8,77E+06	3,57E+06
СКАД (20 Гц)	4,46E+05	4,66E+05	2,43E+05	1,19E+07	1,14E+07	3,79E+06
Частотный диапазон	3,64E+05	3,69E+05	1,82E+05	9,44E+06	9,72E+06	2,71E+06

Таблица 5 — Результаты расчета интегральных усилий над подошвой при шестикомпонентном воздействии. Сравнение результатов применения правила ККСК к суммированию реакций на однокомпонентные воздействия и последней строки Таблицы 4

Расчет	x	y	z	xx	yy	zz
СКАД (50 Гц)	3,15E+05	3,38E+05	8,38E+04	9,09E+06	8,69E+06	4,60E+06
СКАД (20 Гц)	3,36E+05	3,61E+05	2,43E+05	9,06E+06	8,40E+06	3,09E+06
Частотный диапазон	3,29E+05	3,64E+05	1,84E+05	9,00E+06	8,59E+06	2,89E+06
Последняя строка Таблицы 4	3,64E+05	3,69E+05	1,82E+05	9,44E+06	9,72E+06	2,71E+06

Таблица 6 — Результаты расчета интегральных усилий над подошвой при шестикомпонентном воздействии. Сравнение усредненных результатов применения правила ККСК и консервативного правила к суммированию реакций на однокомпонентные воздействия и последней строки Таблицы 4

Расчет	x	y	z	xx	yy	zz
СКАД (20 Гц)	3,91E+05	4,14E+05	2,43E+05	10,48E+06	9,90E+06	3,44E+06
Последняя строка Таблицы 4	3,64E+05	3,69E+05	1,82E+05	9,44E+06	9,72E+06	2,71E+06

диапазоне рассматривался в [1]. В Таблицу 4 сведем результаты расчета на шестикомпонентное воздействие по трем правилам. В первых двух строках используются результаты расчета по программе СКАД в тех же двух вариантах, что и выше, – в том виде, в каком их выдает СКАД (мы помним о нарушении порядка суммирования). Для варианта СКАД (20 Гц) применено консервативное правило суммирования. В последней строке таблицы приведены результаты расчета в частотном диапазоне (их можно считать эталонными, так как суммирование реакций на разные компоненты воздействия велось в каждый момент времени).

Мы снова видим, что по вертикали СКАД без остаточного члена дал резко заниженный результат. Завышенный консерватизм варианта СКАД с 20 Гц объясняется суммированием по предложенному автором консервативному принципу. При использовании ККСК консерватизм станет меньше. В Таблице 5 сравниваются результаты из последней строки Таблицы 4 с результатами применения правила ККСК к суммированию реакций на однокомпонентные воздействия.

Разница между первыми строками Таблиц 4 и 5 объясняется только изменением порядка суммирования по фор-

мам и по компонентам воздействия, о котором говорилось выше. Мы видим, что она всюду невелика, за исключением крутильного момента.

Разница во вторых строках Таблиц 4 и 5 также объясняется, в основном, изменением правила суммирования реакций на различные компоненты воздействия. Мы видим, что правило ККСК в таблице 5 недооценивает реакцию (за исключением вертикальной и крутильной реакций), тогда как консервативное правило в таблице 4 ее во всех случаях переоценивает. Напрашивается очевидная рекомендация усреднить результаты применения этих двух правил. В Таблице 6 приведено сравнение такой усредненной реакции с последней строкой таблиц 4 и 5.

Здесь консерватизм представляется уже вполне разумным.

Сделаем еще одно замечание, не имеющее прямого отношения к суммированию реакций, но имеющее физический смысл. В рассмотренном примере сооружение было сравнительно невысоким (размер фундамента в плане 67,8 x 61,8 м, высота центра тяжести над подошвой около 16 м). Возникает искушение пренебречь угловыми составляющи-

ми движения фундамента и рассчитать сооружение стандартными методами на трехкомпонентное поступательное воздействие. Однако сравнение последней строки Таблицы 4 с Таблицей 3 приводит к выводу, что угловые компоненты воздействия на фундаменте играют пусть не определяющую, но весьма заметную роль в реакции сооружения, поэтому пренебрегать ими нельзя.

Перейдем к выводам.

1. Вычисление одномодальных реакций на однокомпонентные воздействия производится в новой версии СКАД в целом аккуратно. Различия с результатами соответствующего расчета в программе АБАКУС объясняются разницей в моделях сооружения.
2. Суммирование одномодальных реакций для получения реакции на однокомпонентное воздействие в программе СКАД производится в неправильном порядке: сначала суммируются реакции на разные компоненты воздействия по каждой форме в отдельности, а затем реакции по разным формам. Должно быть наоборот. При использовании только правила ККСК разницы нет, но эта разница появляется при отклонении от правила ККСК. Такое отклонение для оговоренных случаев предписывается как гражданскими, так и атомными нормами, поэтому авторам СКАД надо будет изменить порядок суммирования в программе.
3. При вычислении реакций на однокомпонентные воздействия обнаружился эффект значительной (в несколько раз) недооценки вертикальной силы в программе СКАД при использовании традиционного подхода без оста-

точного члена и без учета корреляции между реакциями по высокочастотным формам. Новая версия СКАД с использованием остаточного члена, наоборот, дает консервативное значение вертикальной силы с запасом примерно 30%. Этот вопрос требует дальнейшего изучения – возможно, этот консерватизм вызван ошибками в программе.

4. При суммировании реакций на однокомпонентные воздействия с целью получения реакции на многокомпонентное воздействие наилучшие результаты дает усреднение между двумя правилами: правилом ККСК и консервативным суммированием в предположении о полной корреляции горизонтального и качательного воздействия.
5. Полный неучет угловых компонент воздействия на фундаменте при расчете усилий приводит к неконсервативным результатам. В данном случае степень неконсерватизма достигает примерно 20%. Возможно, этот неконсерватизм немного снизится, если вместо поступательных спектров в центре подошвы использовать огибающие спектры по углам фундаментной плиты, как это предлагают авторы ASCE4-16. Однако этот тезис заслуживает отдельной проверки.
6. Авторы отдают себе отчет в том, что проведенное тестирование, во-первых, ограничивалось интегральными усилиями, а не усилиями в отдельных строительных конструкциях; во-вторых, рассмотрено всего одно конкретное здание. Тем не менее, сделанные выводы могут оказаться полезными как для авторов программы СКАД, так и для расчетчиков.

Литература

1. Тяпин А.Г. Опыт использования комбинированного асимптотического метода для вычисления внутренних усилий в строительных конструкциях: расчеты в частотном диапазоне // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. №6. С.
2. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Малярченко А.А и др. SCAD++. Версия 21.1.3.1. Сборка 03.08.2017.
3. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear

Structures and Commentary. ASCE4-98. Reston, Virginia, USA. 1999.

4. Тяпин А.Г. О суммировании модальных реакций в спектральном методе расчета применительно к сооружениям АЭС // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2011. №4. С.47-52.

5. Тяпин А.Г. Реализация концепции «остаточного члена» в расчетах сооружений на сейсмические воздействия модальным и спектральным методами // Сейсмостой-

кое строительство. Безопасность сооружений. 2014. №4. С.32-35.

6. ABAQUS. Version 6.14-1. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA. 2008.

7. СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*»

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

ТЯПИН А., D. Sc., JSC “Atomenergoproject”, Moscow,

ТОПОРКОВ А., lead engineer JSC “Atomenergoproject”, Moscow

COMBINED ASYMPTOTIC METHOD IN CALCULATION OF THE INTERNAL STRUCTURAL FORCES: LINEAR SPECTRAL ANALYSIS

Abstract

The new options of SCAD soft enabling linear spectral analysis following the requirements of nuclear industry codes were tested against close form solutions, ABAQUS modal analysis and FFT analysis in the frequency domain. Single-mode responses to 1D excitation were checked including angular excitations; then multi-mode responses to 1D excitation were compared including residual modes. Finally the responses

to the six-component excitation set up at the rigid base mat were compared. This excitation was obtained using Combined Asymptotic Method to account for soil-structure interaction. The results demonstrate the unacceptable underestimation of vertical internal forces calculated using civil codes (unlike nuclear codes).

Keywords: seismic response, linear spectral analysis, frequency-domain analysis, combination of peak modal responses.

References

1. Tyapin A.G. Opyt ispol'zovaniya kombinirovannogo asymptoticheskogo metoda dlia vychisleniya vnutrennih usilii v stroitel'nyh konstrukciyah: rashyot v chastotnom diapazone // Seismostoikoye stroitel'stvo. Bezopasnost sooruzheniy. 2017. № 6. С.
2. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A. et al. SCAD++. Version 21.1.3.1. Link of 03.08.2017.
3. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary. ASCE4-98. Reston, Virginia, USA. 1999.
4. Tyapin A.G. O summirovaniy modalnyh reakciy v spectralnom metode rachyota primenitelno k sooruzheniyam AES // Prirodnye i tehnogennyye riski. Bezopasnost sooruzheniy. 2011. No.4. S.47-52.
5. Tyapin A.G. Realizatsia konceptcii "ostatoch-nogo chlena" v rashyotah sooruzheniy na seismicheskiye vozdeystviya modalnym i spectralnym metodami // Seismostoikoye stroitel'stvo. Bezopasnost sooruzheniy. 2014. No.4. S.32-35.
6. ABAQUS. Version 6.14-1. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA. 2008.
7. SP 14.13330.2014 "Stroitel'stvo v seismicheskikh rayonah. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-7-81**"

Для цитирования: Тяпин А. Г., Топорков А. С. Опыт использования комбинированного асимптотического метода для вычисления внутренних усилий в строительных конструкциях: линейно-спектральный расчет // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 6. С. 35-43.

For citation: Tyapin A. G., Toporkov A. S. Combined asymptotic method in calculation of the internal structural forces: linear spectral analysis // Earthquake engineering. Constructions safety. 2017. № 6. P. 35-43.



Qingdao, China, July 22-25, 2018

Second Announcement and Call for Papers 7WCSCM

The 7th World Conference on Structural Control and Monitoring

Welcome to the 7WCSCM

The World Conference on Structural Control and Monitoring (WCSCM) is a premier leading conference, under the auspices of the International Association for Structural Control and Monitoring (IASCM). The WCSCM, held every four years, is aiming at promoting advanced structural control and monitoring technology for a variety of civil, mechanical, aerospace and energy systems. The precedent conferences have been held in Pasadena - USA (1994), Kyoto - Japan (1998), Como - Italy (2002), La Jolla - USA (2006), Tokyo - Japan (2010) and Barcelona - Spain (2014).

The new edition of the WCSCM, 7WCSCM, will be hosted by Harbin Institute of Technology in July 2018. The conference will provide international research community a platform to contribute to the state of the art in such multidisciplinary scientific and engineering environment with new results, fresh ideas and future perspectives.

Qingdao, the hosting city of 7WCSCM, is one of most charming cities along the east coast of China. The mild climate, the beautiful sea beach, and Mount Laoshan make Qingdao City a popular health and holiday resort, particularly in summer, for visitors to sightsee and escape the summer heat.

On behalf of the IASCM and the conference organizing committee, I warmly invite you to join the 7WCSCM.

We look forward to meeting with you in Qingdao in July 2018.

Hui Li

Chair of 7WCSCM, 2018

Changjiang Scholarship Professor Professor of School of Civil Engineering Harbin Institute of Technology, China

<http://smc.hit.edu.cn/wcscm2018>