

А. Г. ТЯПИН

доктор технических наук, АО «Атомэнергoproject», г. Москва

А. С. ТОПОРКОВ

ведущий инженер, АО «Атомэнергoproject», г. Москва

В. С. МИХАЙЛОВ

руководитель центра научно-технической поддержки ГК SCAD SOFT, г. Новосибирск

УДК 624.042.7

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО АСИМПТОТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ РАСЧЕТА ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ: РЕЗУЛЬТАТЫ

Комбинированный асимптотический метод (КАМ), разработанный для учета динамического взаимодействия сооружений с основанием при сейсмических воздействиях (SSI), традиционно применяется при расчете тяжелых и сравнительно жестких сооружений АЭС. Однако некоторые современные гражданские сооружения по своим параметрам (прежде всего, по размерам и массам) уже приближаются к сооружениям АЭС. Возникает вопрос о степени влияния и о необходимости учета эффектов SSI в расчетах подобных сооружений. В статье приводятся результаты применения КАМ к расчету высотного сооружения на модельном однородном основании. Главной особенностью рассматриваемого сооружения по сравнению с сооружениями АЭС оказываются очень низкие значения (около 0,1 Гц) первых собственных частот на защемленном фундаменте, относящихся к горизонтально-качательным формам, а также интенсивное накопление модальных масс (особенно качательных) при частотах, значительно меньших несущих частот сейсмического воздействия. В результате на частотах воздействия эффективные массы в горизонтальных и качательных направлениях резко уменьшаются, и влияние эффектов SSI в этих направлениях оказывается неожиданно малым. В вертикальном направлении первые собственные частоты сооружения на защемленном фундаменте на порядок больше, чем в горизонтально-качательных формах

(низшая частота составила около 1,5 Гц), что делает вертикальную реакцию более похожей на реакцию сооружений АЭС: влияние эффектов SSI здесь намного заметнее. В связи с большим объемом материала в настоящей статье представлены только результаты расчета с минимальными комментариями. Приведены спектры ускорений на подошве фундамента при трехкомпонентном сейсмическом воздействии, и максимальные усилия под подошвой фундамента для варианта расчета сооружения на защемленном фундаменте, а также для трех вариантов податливого грунтового основания. Анализ полученных результатов авторы надеются представить в следующих публикациях.

Ключевые слова: сейсмическая реакция, взаимодействие сооружений с основанием, комбинированный асимптотический метод, высотное здание.

Учет взаимодействия сооружений с основанием при сейсмических воздействиях (в мировой литературе это взаимодействие обозначается SSI – от Soil-Structure Interaction) является обязательным при расчетах сооружений ядерных объектов [1]. Вместе с тем при расчетах гражданских сооружений такой учет пока обязательным не является [2].

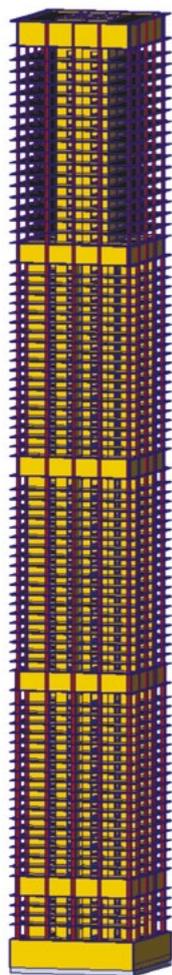


Рисунок 1 — Общий вид модели

Физический смысл отказа от учета SSI состоит в предположении о том, что колебания фундамента можно задавать по данным сейсмологов о колебаниях поверхности основания в отсутствие сооружений (иными словами, появление сооружения не меняет колебания основания). Иногда такой подход называют «расчетом на защемленном фундаменте» (фундамент при этом движется, но его движение задается, а не вычисляется). Если расчет проводить в относительных перемещениях, то фундамент оказывается по-настоящему защемленным.

В последние годы ответственные гражданские сооружения по многим своим параметрам (по размерам, по массе) приближаются к ответственным сооружениям АЭС. Возникает вопрос о необходимости учета SSI для подобных сооружений. Для ответа на него необходимо определить, насколько значимы для гражданских сооружений эффекты SSI. В свою очередь, для этого необходимо провести расчеты гражданских сооружений на сейсмические воздействия с учетом SSI, а после этого сравнить сейсмическую реакцию сооружений с учетом и без учета SSI.

Представляется, что удобный аппарат для этого предоставляет комбинированный асимптотический метод (КАМ) [3]. Напомним, что сначала в нем определяется сейсмическая реакция жесткого фундамента с учетом SSI, а затем эта реакция в виде шестикомпонентного движе-

ния задается в качестве кинематического воздействия на фундаменте, и рассчитывается реакция верхнего строения. Таким образом, второй шаг расчета по КАМ по своей идеологии соответствует традиционному расчету гражданских сооружений по схеме «защемленного фундамента». Разница только в том, что задаваемое в качестве воздействия движение фундамента берется не по данным сейсмологов о движении поверхности грунтового основания, а по результатам промежуточного расчета, в котором данные сейсмологов являются только воздействием, а реакция фундамента зависит еще и от свойств основания, и от свойств верхнего строения. В результате движение фундамента отличается от движения поверхности основания как в поступательных направлениях, так и по вращательным степеням свободы (в большинстве расчетов гражданских сооружений вращательные компоненты движения поверхности основания вообще отсутствуют, а в реакции фундамента они присутствуют).

Весь вопрос в том, насколько существенными являются эти различия между движением основания и движением фундамента. В настоящей статье рассматривается модель высотного здания. В связи с большим объемом материала в первой публикации приведены только результаты расчетов с минимумом комментариев. Разбору этих результатов будут посвящены следующие публикации.

Рассмотрим 76-этажное офисное здание с пятью аутригерными этажами общей высотой 327 м. Геометрия объекта воссоздана авторами в бесплатном препроцессоре ФОРУМ в составе SCAD 21.1. Фундаментная плита имеет толщину 4 м и размеры в плане 40 x 40 м. Такие же размеры в плане имеют и этажи. Сооружение имеет массу 224804,6 т (для сравнения – масса реакторного отделения АЭС составляет порядка 360 т.т, т.е. рассматриваемое сооружение имеет вполне сопоставимую массу). Высота центра тяжести над срединной поверхностью фундаментной плиты составляет 144 м. Подчеркнем, что в эту массу не входят ограждающие конструкции и полезные нагрузки. Общий вид модели показан на рис.1.

Изначально модель здания на защемленном фундаменте была собрана в программе СКАД [4], а затем конвертирована в программу ABAQUS [5], в которой и был проведен модальный анализ модели сооружения на защемленном фундаменте. Модель имела 214887 узлов и 1289322 степени свободы. Число конечных элементов составило 245759. Оказалось, что низшие частоты составляют порядка 0,1 Гц. Было вычислено 7500 низших форм; при этом собственные частоты поднялись только до 25,6 Гц. Отметим, что здесь мы видим принципиальное различие между рассматриваемым сооружением и типичными сооружениями АЭС, у которых низшие значимые частоты модели на защемленном фундаменте составляют порядка 3-4 Гц, а в диапазон до 50 Гц попадают около 1000 собственных частот.

Напомним базовое уравнение КАМ [3] для расчета колебаний фундамента в частотном диапазоне:

$$[C_s(\omega) - \omega^2 M(\omega)] U(\omega) = B_s(\omega) U_0(\omega) \quad (1)$$

Здесь ω – круговая частота, являющаяся текущим параметром. Далее, $C_s(\omega)$ – комплексная симметричная матрица размером 6 x 6 динамической жесткости основания

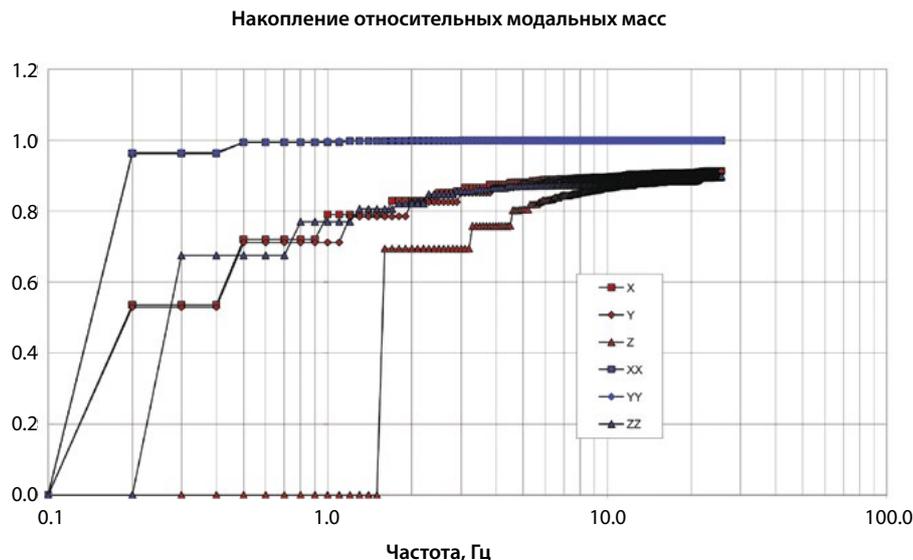


Рисунок 2 — Накопление модальных масс вдоль шести обобщенных координат

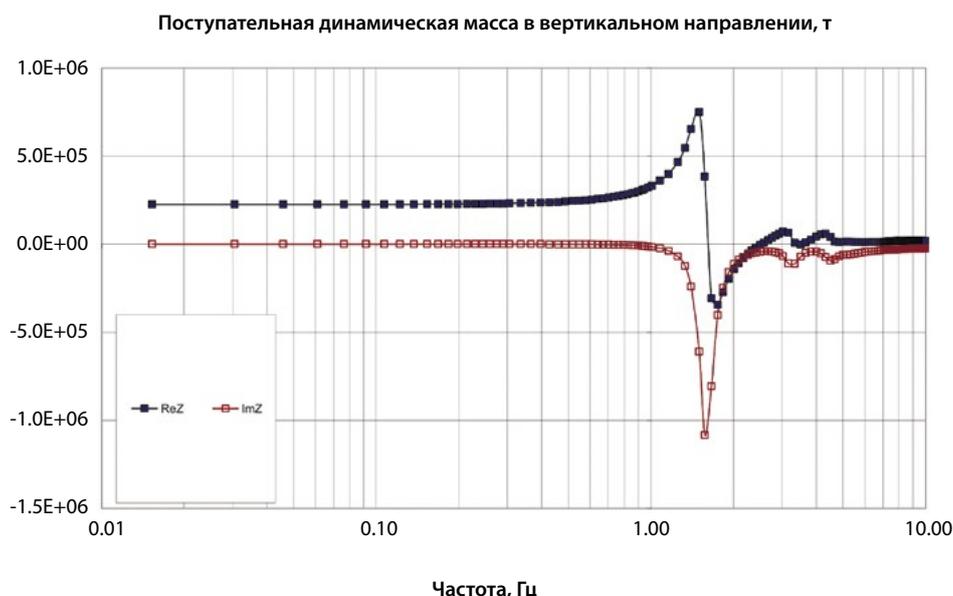


Рисунок 3 — Динамическая масса по вертикальному поступательному направлению

по отношению к жесткому штампу (иногда ее называют матрицей импедансов). Она не зависит от свойств верхнего строения, а зависит только от свойств основания и геометрии контактной поверхности фундаментной части, взаимодействующей с грунтом. Следующая матрица $M(\omega)$ – матрица динамической инерции. Она тоже комплексная и симметричная и тоже имеет размер 6×6 . Эта матрица зависит только от свойств сооружения; она не зависит ни от свойств основания, ни от воздействия. Определяется эта матрица по данным об инерции сооружения как жесткого целого (это чисто действительная частотно-независимая матрица M_0 размером 6×6), но вместе с этим добавляются данные о податливости верхнего строения – они вводятся через собственные частоты, модальное демпфирование и коэффициенты участия форм собственных колебаний сооружения на защемленном фундаменте [6]:

$$M(\omega) = M_0 + \sum_{j=1}^n \frac{\omega^2}{\Omega_j^2 - \omega^2 + 2i\omega\Omega_j\gamma_j} S_j^T S_j \quad (2)$$

Здесь Ω_j – собственная частота номер j ; γ_j – модальное демпфирование для этой формы; S_j – строка из шести коэффициентов участия для этой формы (после нормировки форм по массе); n – общее число учитываемых в расчете форм; i – мнимая единица. Как видим, модальное демпфирование приводит к тому, что знаменатель дроби под знаком суммы становится комплексным.

Если бы коэффициенты модального демпфирования были нулевыми, матрица динамической инерции была бы чисто действительной. Еще одно замечание – отличие матрицы динамической инерции $M(\omega)$ от матрицы жесткой инерции M_0 пропорционально квадрату частоты.

Поступательные динамические массы в горизонтальных направлениях, т

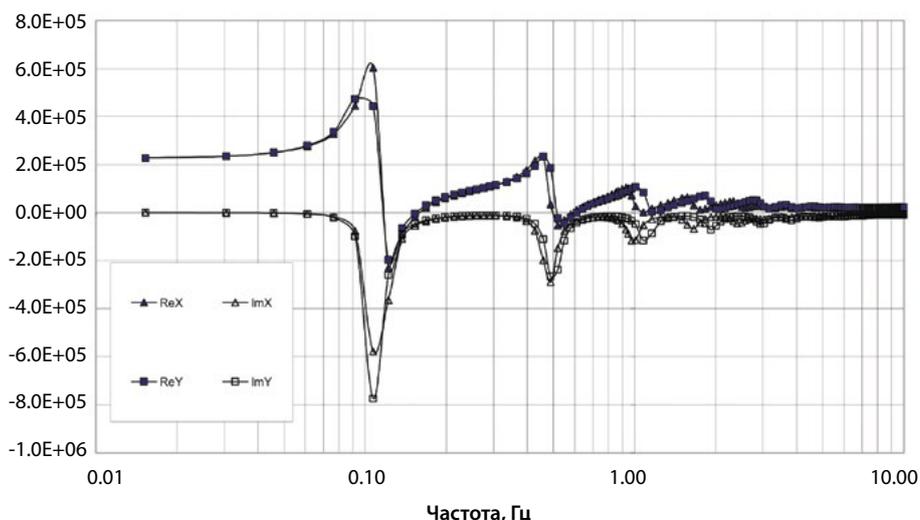


Рисунок 4 — Динамические массы по двум горизонтальным поступательным направлениям

Поступательные динамические массы в качательных направлениях, т м²

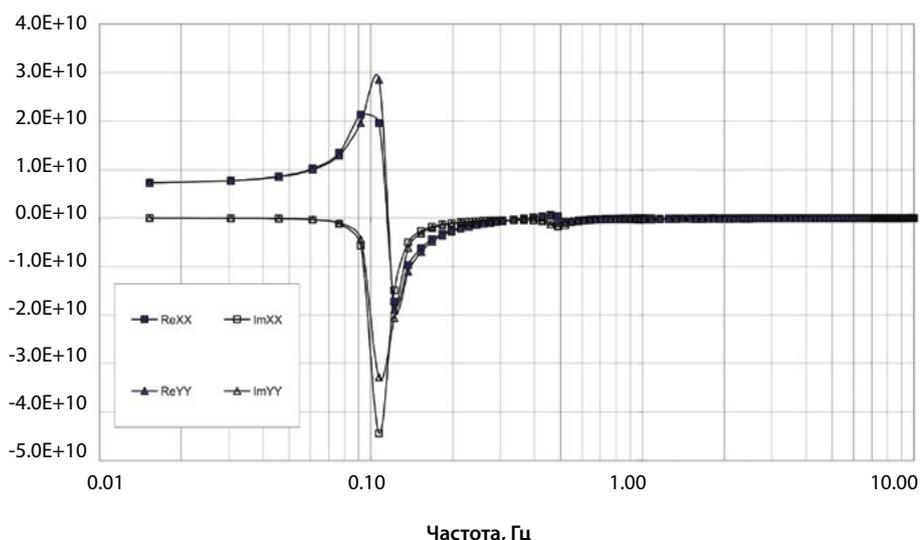


Рисунок 5 — Динамические массы по качательным степеням свободы

Вернемся к формуле (1) и продолжим обсуждать входящие в нее величины. $U(\omega)$ – вектор из шести компонент, описывающий перемещения жесткого фундамента в частотном диапазоне. $V_s(\omega)$ – матрица сейсмических нагрузок, действующих на неподвижно удерживаемый фундамент при распространении в основании сейсмической волны с единичной амплитудой поступательных перемещений в выбранном направлении в контрольной точке (обычно на поверхности свободного основания). Эта матрица комплексная и частотно-зависимая, она имеет размер 6×3 . Матрица нагрузок, как и матрица импедансов, не зависит от свойств сооружения, а зависит только от свойств основания и от геометрии контактной поверхности. В отличие от матрицы импедансов, она зависит еще и от типа сейсмической волны. В распространенном случае, когда грунтовое основание является горизонтально-слои-

стым (а в простейшем случае – вообще однородным), когда сейсмическая волна в нем распространяется снизу вверх, а жесткий фундамент расположен на поверхности, матрица $V_s(\omega)$ полностью совпадает с первыми тремя столбцами матрицы импедансов $C_s(\omega)$.

Наконец, $U_0(\omega)$ – вектор из трех компонент, описывающий поступательные сейсмические перемещения контрольной точки, заданной в основании в отсутствие сооружения. Удобно применить искусственный прием – заменить вектор U_0 из трех компонент на вектор U_1 из шести компонент, положив последние три из шести компонент равными нулю. Тогда в том типовом случае поверхностного жесткого фундамента, о котором говорилось выше, можно переписать уравнение (1) в виде

$$[C_s(\omega) - \omega^2 M(\omega)] U(\omega) = C_s(\omega) U_1(\omega) \quad (3)$$

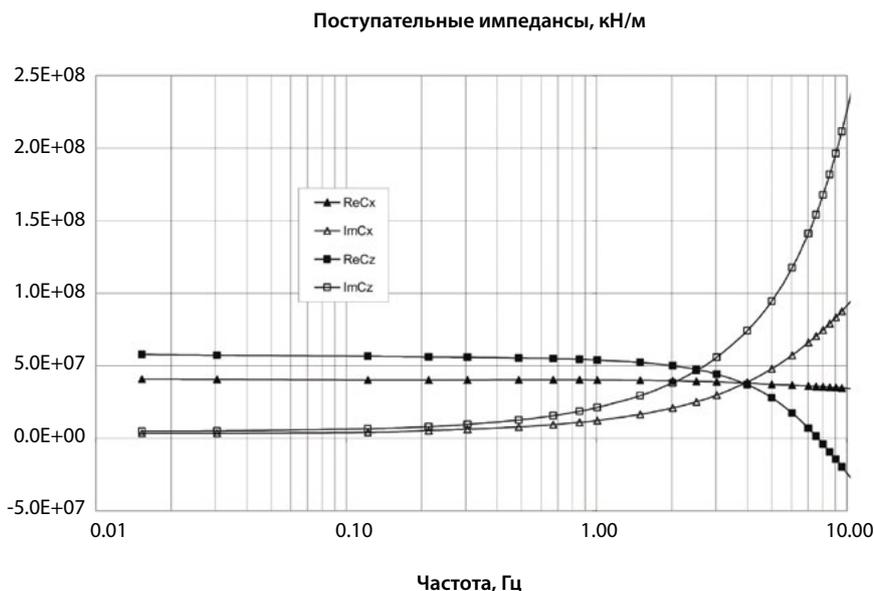


Рисунок 6 — Поступательные импедансы по горизонтали и по вертикали

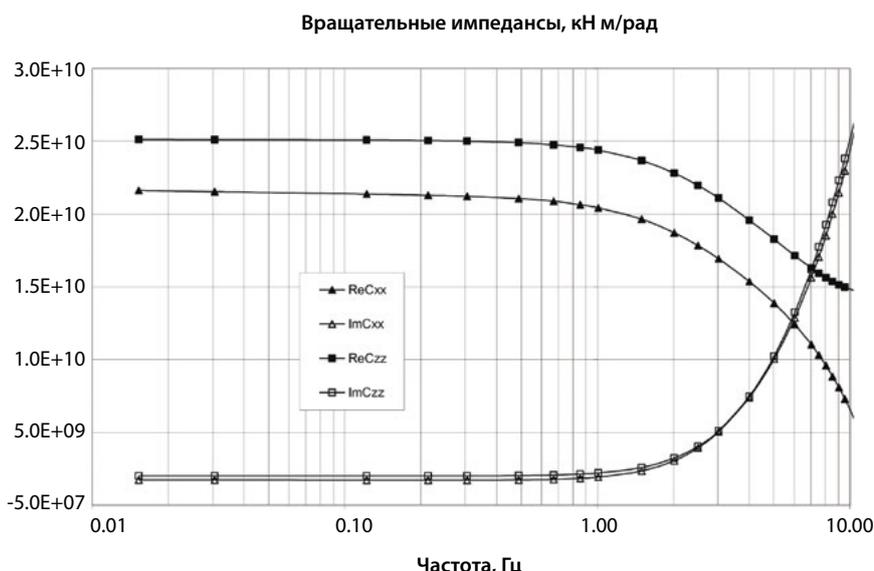


Рисунок 7 — Угловые импедансы – качательный и крутильный

Вернемся к рассматриваемому сооружению. На рис. 2 показано накопление относительных модальных масс вдоль шести обобщенных координат. По оси абсцисс отложена частота, по оси ординат – сумма всех модальных масс по формам, чьи собственные частоты оказались ниже текущей частоты. Эта сумма отнесена к общей массе по соответствующему направлению. При повышении частоты накопленная модальная масса по каждому направлению стремится не к единице, а к немного меньшему значению – это вызвано тем, что часть массы, связанная с фундаментом, не задействована ни в одной форме колебаний сооружения на защемленном фундаменте. Действительно, объем фундаментной плиты составляет $40 \times 40 \times 4 = 6400 \text{ м}^3$. При плотности бетона $2,75 \text{ т/м}^3$ это дает массу фундаментной плиты 17600 т , что составляет $7,83\%$ общей массы. К этому надо бы еще добавить часть (в пер-

вом приближении половину) массы стен нижнего этажа. Таким образом, максимальная накопленная масса по трем поступательным направлениям ограничена сверху (даже без учета массы стен нижнего этажа) значением $92,17\%$. На частоте $25,6 \text{ Гц}$ по горизонтальным направлениям накоплено уже $90,7$ и $90,8\%$. Медленнее всего накапливается модальная масса по поступательному вертикальному направлению. Быстрее всего накапливаются модальные массы по качательным степеням свободы. По ним масса фундамента тоже не работает, но ее роль в качательных моментах инерции намного меньше, чем в поступательных массах.

На рис. 3 показана динамическая масса по вертикальному поступательному направлению – отдельно действительная и отдельно мнимая части. Поведение этой массы вполне традиционно [6] (если не считать сравнительно

Модули передаточных функций к колебаниям фундамента X(X)

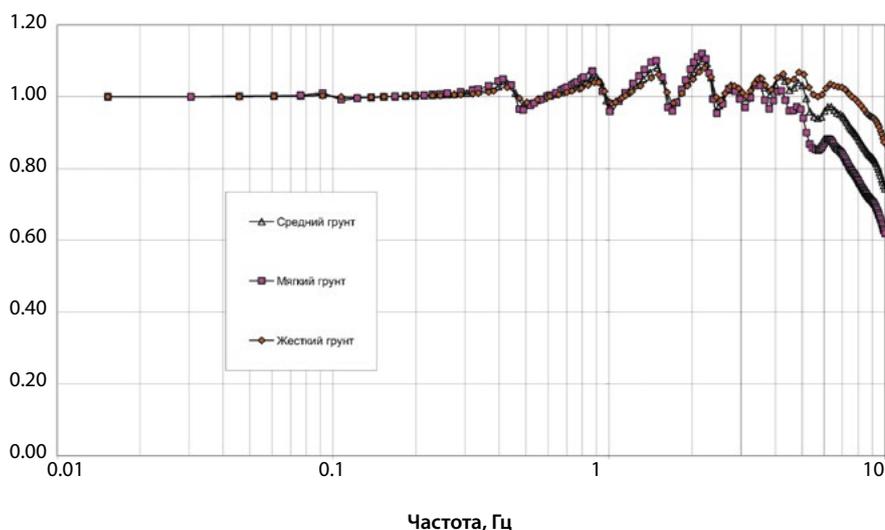


Рисунок 8 — Модули передаточных функций X (X)

Модули передаточных функций к колебаниям фундамента YY(X)

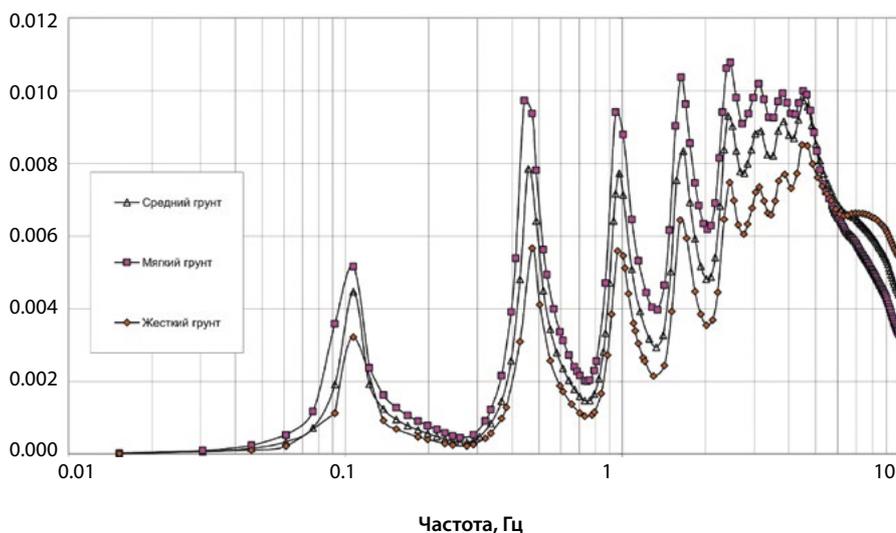


Рисунок 9 — Модули передаточных функций YY (X)

малых собственных частот). При низких частотах динамическая масса практически действительная и очень близка к традиционной массе. Затем мы видим первый резонанс на частоте около 1,5 Гц (см. скачок кривой накопления модальных масс вдоль Z на рис. 2). После этого на частотах около 3,3 и 4,5 Гц идут два резонанса меньшей амплитуды (снова можно обратиться к рис. 2 для сравнения). После каждого очередного резонанса действительная часть становится все меньше.

На рис. 4 показаны динамические массы по двум горизонтальным поступательным направлениям. В принципе, мы наблюдаем здесь ту же картину, что на рис. 3, но резонансные частоты еще меньше.

Кстати, это порождает некоторые вычислительные проблемы с шагом по времени и шагом по частоте. Дело в том, что комбинированный асимптотический метод (КАМ)

использует быстрое преобразование Фурье (БПФ) [6]. Частоты в нем дискретные, и шаг по частоте равен

$$\Delta f = (N \Delta t)^{-1} \quad (4)$$

Значение числа Фурье N (это должна быть степень двойки) по программным соображениям ограничено 8192. Если выбрать шаг по времени 0,004 с, как это принято в расчетах АЭП последнего времени, то шаг по частоте согласно (4) окажется равным 0,0305 Гц. Этого более чем достаточно для подробного описания резонансных кривых в расчетах жестких атомных сооружений, однако на рис.4 точки с таким шагом в районе первого резонанса окажутся расположенными слишком редко. Поэтому исходный шаг акселерограммы, составлявший 0,004 с, пришлось увеличить вдвое до 0,008 с. Соответственно продолжительность акселерограммы при расчете по БПФ должна составить

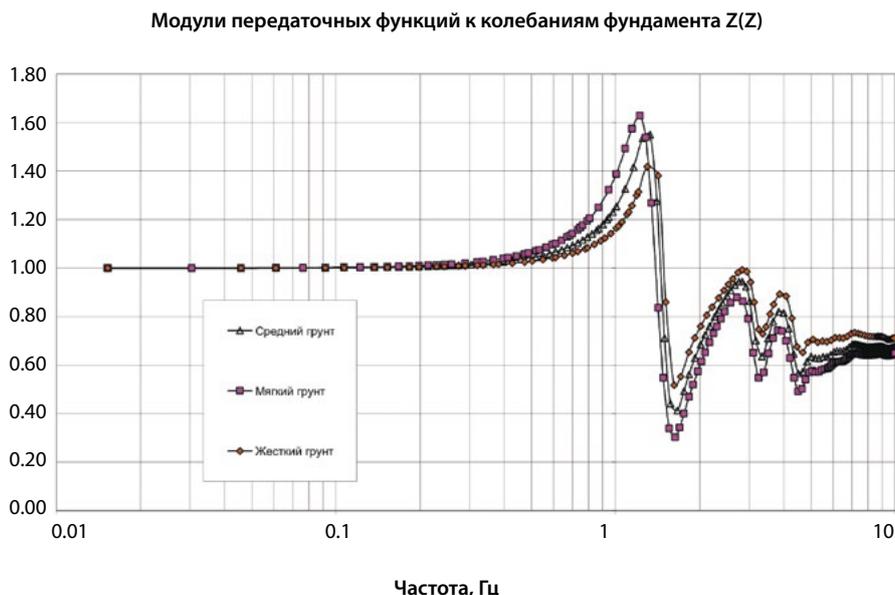


Рисунок 10 — Модули передаточных функций Z (Z)

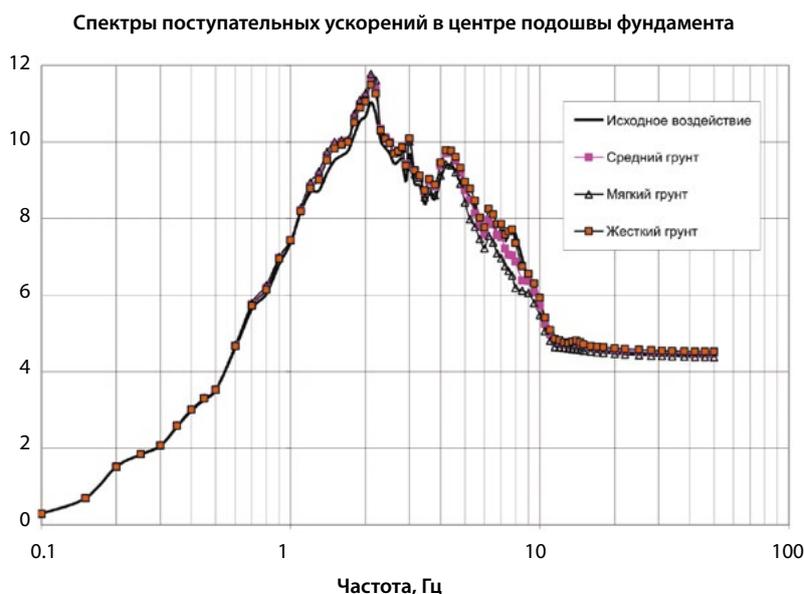


Рисунок 11 — Спектры ускорений с демпфированием 7% вдоль оси OX, вычисленные в центре подошвы фундамента

65,536 с. Если продолжительность реальной акселерограммы меньше, ее необходимо дополнить нулями до требуемой продолжительности.

По качательным степеням свободы, как следует из рис. 2, модальные массы накапливаются быстрее всего. На рис. 5 показаны динамические массы по качательным степеням свободы. Мы видим, что вторые резонансы в районе 0,45 Гц совсем невелики – решающую роль играет первый резонанс в районе 0,1 Гц.

Далее согласно процедуре КАМ [6] определим импедансы жесткого фундамента на грунтовом основании. В качестве основания зададим однородное полупространство со средними грунтами: плотность 2 т/м^3 , скорость сдвиговых волн $V_s=400 \text{ м/с}$, скорость продольных волн $V_p=1300 \text{ м/с}$. Материальное демпфирование в грунте при-

ем на уровне 4%. Матрица импедансов (комплексная частотно-зависимая матрица размером 6×6) рассчитывалась по программе SASSI [7]. На рис.6 показаны поступательные импедансы по горизонтали (они совпадают, поскольку фундамент квадратный в плане) и по вертикали – это три первых диагональных элемента матрицы импедансов.

На рис. 7 показаны угловые импедансы – качательные в двух вертикальных плоскостях (они совпадают между собой) и крутильный. Это три последних диагональных элемента матрицы импедансов. Импедансы ведут себя вполне предсказуемо [6].

Здесь сделаем важное замечание. Модель фундамента в виде штампа на поверхности полупространства в данном случае носит условный, методический характер: понятно, что при возведении высотного здания на нескальном ос-

Спектры поступательных ускорений в центре подошвы фундамента

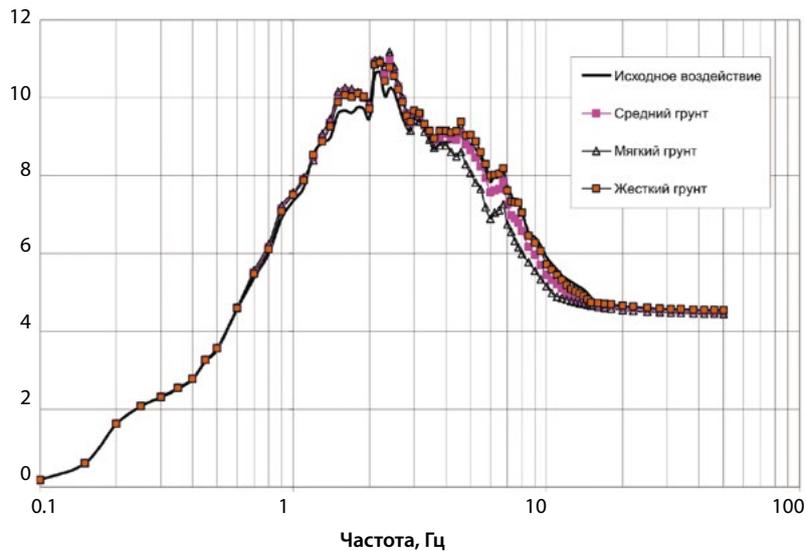


Рисунок 12 — Спектры ускорений с демпфированием 7% вдоль оси OY, вычисленные в центре подошвы фундамента

Спектры поступательных ускорений в центре подошвы фундамента

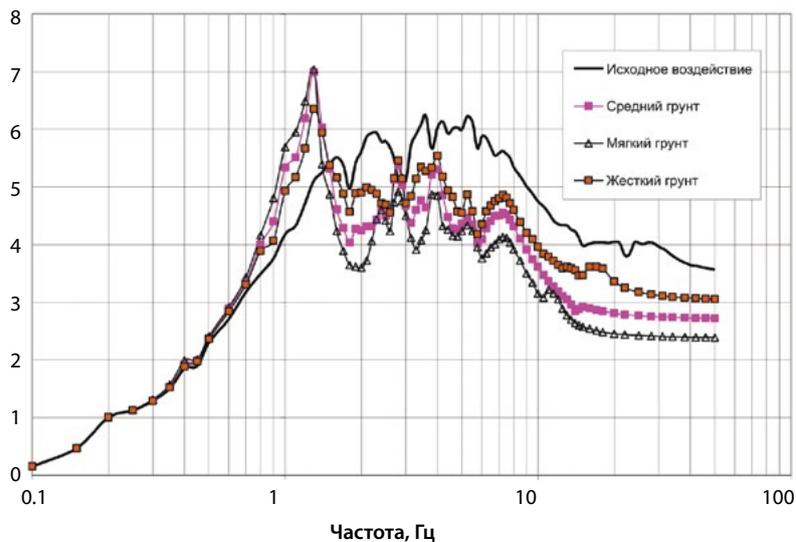


Рисунок 13 — Спектры ускорений с демпфированием 7% вдоль оси OZ, вычисленные в центре подошвы фундамента

новании обязательно будут использоваться сваи; скорее всего, появится и развитая подземная часть. В КАМ можно посчитать импедансы и матрицу нагрузок и для заглубленного жесткого фундамента на сваях, но в нашем случае конкретные значения не так важны. Цель данной работы – оценить, в каком направлении влияет учет SSI на результаты.

Следующим этапом расчета [6] является получение передаточных функций от колебаний свободной поверхности основания к колебаниям жесткого фундамента. При этом частота за частотой решается уравнение (1). Согласно практике и нормам атомных расчетов [1, 6], наряду с базовым грунтовым основанием, описанным выше, рассматриваются еще два основания, которые отличаются от базового модулями упругости в полтора раза в обе стороны. Скорости волн пропорциональны квадратным корням

из модулей, так что варьирование по скоростям волн составляет 1,225 в обе стороны. На рис.8 показаны модули передаточных функций $X(X)$ – т. е. компонента воздействия направлена вдоль оси X, и реакция фундамента получена вдоль той же оси X.

Сразу приведем и передаточные функции $Y(X)$ – т. е. от поступательного движения свободной поверхности к качанию фундамента при том же воздействии. Они показаны на рис. 9.

Мы видим, что влияние первых резонансов монотонно нарастает. Как ни странно, но доминантный с точки зрения модальных масс горизонтально-качательный резонанс практически не сказывается на колебаниях фундамента по горизонтали, да и на качательных колебаниях фундамента сказывается меньше всего. Наиболее заметным с точки

Спектры угловых ускорений на подошве фундамента

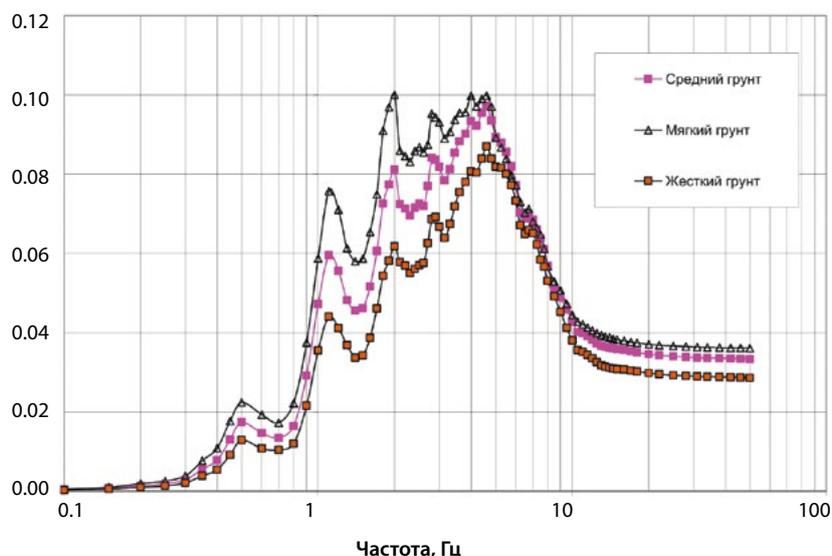


Рисунок 14 — Спектры вращательных ускорений с демпфированием 7% вокруг оси OX, вычисленные на фундаменте

Спектры угловых ускорений на подошве фундамента

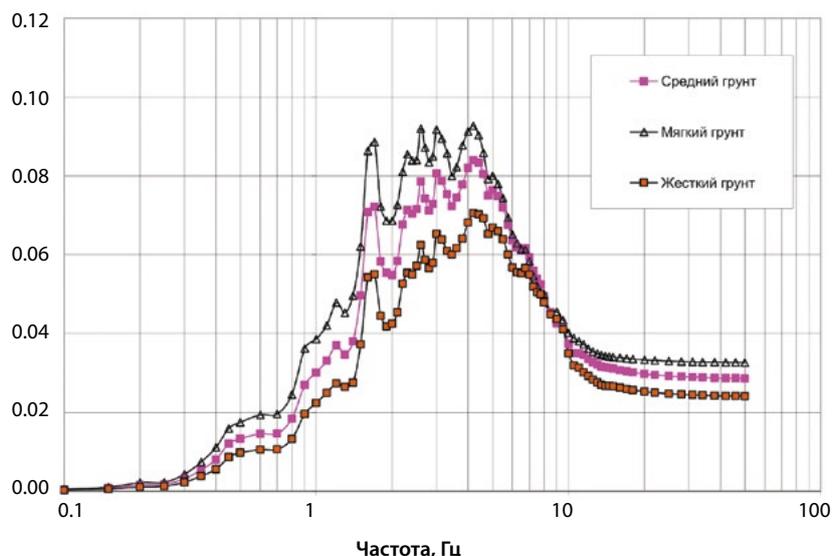


Рисунок 15 — Спектры вращательных ускорений с демпфированием 7% вокруг оси OY, вычисленные на фундаменте

зрения передаточных функций к колебаниям фундамента оказывается пятый резонанс на частоте примерно 2,4 Гц.

Все влияние резонансов в данном случае ограничивается частотным диапазоном примерно до 7 Гц, после чего передаточные функции начинают вести себя гладко. В «резонансном» диапазоне влияние жесткости грунта на SSI ожидаемо – чем жестче грунт, тем меньше влияние (т.е. поступательные функции ближе к единице, а вращательные ближе к нулю).

Приведем также передаточные функции по вертикали $Z(Z)$. Они показаны на рис. 10. В отличие от горизонтально-качательных колебаний, здесь поведение передаточных функций совпадает с тем, что мы привыкли видеть для

более жестких сооружений АЭС [6], – первый резонанс является доминантным одновременно и по динамическим массам, и по передаточным функциям.

Следующая стадия расчета по КАМ [6] – определение движения фундамента во времени. Здесь нам дополнительно потребуется информация о сейсмическом воздействии. С учетом характеристик грунта возьмем для расчета акселерограмму воздействия, полученную для глубокой грунтовой площадки (этот термин означает, что на видимой глубине отсутствуют скальные породы).

На рис. 11 показаны спектры ускорений с демпфированием 7% вдоль оси OX, вычисленные в центре подошвы фундамента. Приведены три спектра (для трех грунтов,

Таблица 1 — Сравнение максимальных по модулю усилий под подошвой, вызванных сейсмическим воздействием

Вариант	X	Y	Z	XX	YY	ZZ
Средний	0,20713E6	0,24391E6	0,78674E6	0,10259E8	0,10500E8	0,68797E5
Мягкий	0,20232E6	0,23229E6	0,74783E6	0,91761E7	0,99954E7	0,66400E5
Жесткий	0,22761E6	0,25129E6	0,85553E6	0,10978E8	0,11307E8	0,70847E5
Защемленный	0,27400E6	0,26882E6	0,84750E6	0,11914E8	0,12147E8	0,72057E5

Таблица 2 — Сравнение максимальных по модулю ускорений в центре подошвы, вызванных сейсмическим воздействием

Вариант	X	Y	Z	XX	YY	ZZ
Средний	4,4672	4,4764	2,7123	0,33152E-1	0,28545E-1	0,90462E-3
Мягкий	4,3615	4,4306	2,3787	0,35942E-1	0,32532E-1	0,12283E-2
Жесткий	4,5110	4,5362	3,0297	0,28479E-1	0,24027E-1	0,61282E-3
Защемленный	4,4136	4,5192	3,4364	0	0	0

Спектры угловых ускорений на подошве фундамента

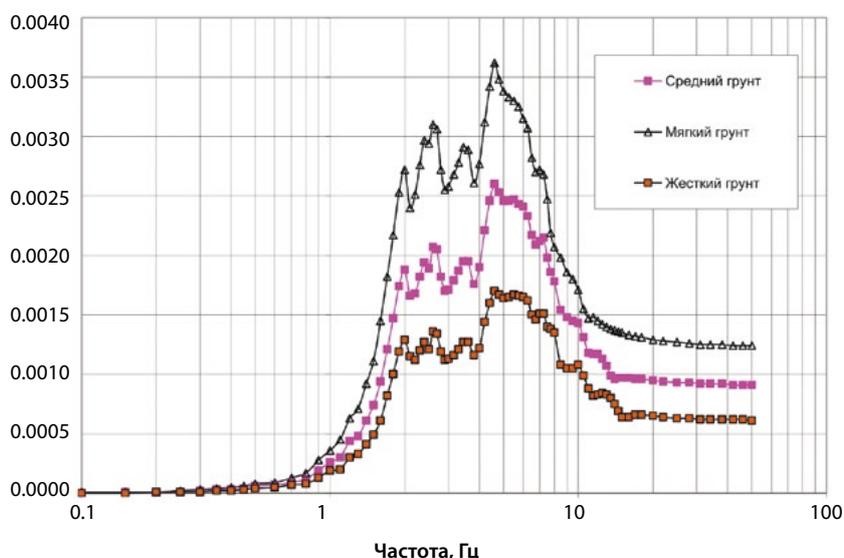


Рисунок 16 — Спектры вращательных ускорений с демпфированием 7% вокруг оси OZ, вычисленные на фундаменте

упомянутых выше) и дополнительно спектр исходной акселерограммы.

На рис. 12 приведены аналогичные спектры вдоль оси OY.

Как видим, спектры ускорений реакции на рис.11 и 12 не очень отличаются от спектров ускорений воздействия. Если бы сейсмическая реакция фундамента происходила только по этим горизонтальным поступательным степеням свободы, можно было бы сделать вывод о том, что эффекты SSI на нее влияют слабо, - т.е. можно рассчитывать сооружение по схеме защемленного фундамента. Однако у жесткого фундамента не две, а шесть степеней свободы. На рис.13 приведены спектры ускорений с демпфиро-

ванием 7% вдоль оси OZ, вычисленные в центре подошвы фундамента.

По вертикали мы наблюдаем на рис.13 картину, более привычную для расчетчиков сравнительно жестких сооружений АЭС [6]. На низких частотах спектр реакции совпадает со спектром воздействия (это физически очевидно и служит, скорее, проверкой правильности вычислений). Затем в районе первого доминантного резонанса спектр реакции имеет пик над спектром воздействия, после чего при дальнейшем повышении частоты уходит под спектр воздействия. Такая же в целом картина повторяется для следующих пиков, только размах флуктуаций меньше. Этого следовало ожидать, глядя на рис.10. Впрочем, коммен-

тарии оставим на дальнейшие публикации. Пока же можно сделать вывод о том, что по вертикали влияние SSI намного заметнее, чем по горизонтали.

Наконец, реакция жесткого фундамента имеет три вращательные компоненты: две качательные и одну крутильную. Сравнить их можно только друг с другом, поскольку у воздействия на свободном основании вращательных компонент нет. Поэтому просто приведем на рис.14...16 соответствующие спектры ускорений реакции фундамента на трех грунтах.

В отличие от сооружений АЭС, для которых очень важны спектры ускорений на отметках сооружения (по ним рассчитывается оборудование, определяющее безопасность объекта), для гражданских сооружений главными являются усилия. Чтобы не выходить за рамки КАМ, будем сравнивать интегральные усилия под подошвой фундамента – они с инженерной точностью соответствуют интегральным усилиям в конструкциях первого этажа, которые традиционно являются наиболее нагруженными. Сравним три варианта грунтового основания, о которых говорилось выше (средний, мягкий и жесткий), а также добавим к ним четвертый вариант, имеющий смысл защемленного

фундамента. Четвертый вариант реализуется в КАМ просто – матрица импедансов в уравнении (3) просто масштабируется в 1000000 раз. В таблице 1 приведено сравнение максимальных по модулю усилий под подошвой, вызванных сейсмическим воздействием. Силы даны в кН, моменты (три последних столбца) – в кН·м.

В таблице 2 приведено сравнение максимальных по модулю ускорений в центре подошвы, вызванных сейсмическим воздействием. Поступательные ускорения даны в м/с², угловые ускорения (три последних столбца) – в рад/с².

Подведем итоги. В статье представлены расчеты высотного гражданского сооружения на сейсмическое воздействие с учетом взаимодействия с основанием (SSI) по комбинированному асимптотическому методу. Для фундамента принята условная модель жесткого штампа на поверхности однородного полупространства. Результаты в формате движения жесткого фундамента и в формате интегральных усилий под подошвой сравниваются с результатами расчета по схеме защемленного фундамента, т. е. без учета SSI.

Авторы надеются обсудить полученные результаты в следующих публикациях.

Литература

1. *Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary*. ASCE/SEI 4-16. Reston, Virginia, USA. 2017
2. Свод правил СП 14.13330.2014. «Строительство в сейсмических районах» СНиП II-7-81*. Издание официальное. М.: Министрство строительства и жилищно-коммунального хозяйства, 2014.
3. Тяпин А.Г. Расчет сооружений на сейсмические воздействия с учетом взаимодействия с грунтовым основанием. Научное издание. М.: Издательство АСВ, 2016. 392 с.

4. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А и др. SCAD++. Версия 21.1.7.1. Сборка 27.03.2018.
5. ABAQUS. Version 6.8. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA. 2008.
6. Тяпин А.Г. Учет взаимодействия сооружений с основанием при расчетах на сейсмические воздействия. Руководство по расчетам. М.: Издательство АСВ. 2014. 136 с.

7. 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@bvsct

ТЯПИН А., D. Sc., JSC "Atomenergoproject", Moscow

ТОПОРКОВ А., lead engineer JSC "Atomenergoproject", Moscow

МИХАЙЛОВ В., Head of Novosibirsk SCAD Office scientific and technical support center, Novosibirsk

COMBINED ASYMPTOTIC METHOD IN SEISMIC ANALYSIS OF HIGH-RISE BUILDING: RESULTS

Abstract

Combined Asymptotic Method (CAM) has been developed and used for SSI analysis of stiff and heavy NPP structures. However, some of civil structures nowadays are comparable with NPP structures in terms of size and mass. The question is whether SSI is significant for such structures and whether it should be accounted for in the design process. The authors apply CAM to the seismic analysis of the high-rise structure resting on a sample homogeneous half-space modeling soil. The main peculiarity of this structure as compared to the conventional NPP structures are very low first natural frequencies of the fixed-base model for the horizontally-rocking modes, and very intensive accumulation of the modal masses (especially rocking ones) in the frequency range far below dominant excitation frequency. As a result, at the dominant excitation frequency the effective hori-

zontal and rocking masses are far less than the conventional masses, and the overall impact of SSI is surprisingly small. In the vertical direction the first natural frequency is greater (about 1.5 Hz) which makes vertical seismic response look like conventional seismic response of the NPP structures – and SSI effects are more pronounced here. Due to the wide scope of results only main results are presented here. 6D response spectra for rigid base calculated for three variants of soil parameters are compared to 3D spectra of excitation. Maximal integral forces under the base are presented in comparison with those obtained for the fixed-base analysis and with maximal accelerations of the base. The authors are going to provide detailed comments in the nearest future.

Keywords: seismic response, soil-structure interaction, combined asymptotic method, high-rise building.

References

1. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary. ASCE/SEI 4-16. Reston, Virginia, USA. 2017
2. SP 14.13330.2014 "Stroitel'stvo v seismicheskikh rayonah. Aktualizirovannaya redakciya SNiP II-7-81**"
3. Tyapin A.G. Raschyot sooruzheniy na seismicheskiye vozdeistviya s uchuyotom vzaimodeistviya s gruntovym osnovaniyem. Nauchnoye izdaniye. M.: Izdatelstvo ASV, 2016. 392 s.
4. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A. et al. SCAD++. Version 21.1.7.1. Link of 27.03.2018.
5. ABAQUS. Version 6.8. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA. 2008.
6. Tyapin A.G. Seismic analysis of structures considering soil-structure interaction. Manual for analysis – Moscow: ASV, 2014. 136 p.
7. 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., Топорков А.С., Михайлов В.С. Применение комбинированного асимптотического метода для расчета высотного здания на сейсмическое воздействие: результаты // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 4. С. 32-43.

For citation: Tyapin A.G., Toporkov A.S., Mikhailov V.S. Combined asymptotic method in seismic analysis of high-rise building: results // *Seismostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake engineering. Constructions safety], 2018, no. 4, pp. 32-43. (In Russian).

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «СЕЙСМОСТОЙКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО. БЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ»

Текст:

1. **Объем статьи** не должен превышать **40 000** знаков.
2. **Количество авторов** статьи – не более 3-х.
3. **Сведения об авторе** должны содержать: ФИО, регалии, место работы и должность, почтовый и электронный адреса, контактный телефон **на русском и английском языках**. Необходима фотография в формате TIF, JPG.
4. **Ключевые слова** к статье* должны быть **на русском и английском языках**.
5. **Аннотация** к статье должна содержать 100–250 слов **на русском и английском языках**. Аннотация на английском языке не должна полностью повторять текст аннотации на русском языке. Статья должна содержать: введение, цели задачи, методы, результаты, заключение.
6. Обязательно наличие **библиографического списка** с ссылками по тексту на русском (ГОСТ Р7.0.5–2008) и английском языках (или латиницей по правилам Scopus).
7. Обязательное приложение – **рекомендательное письмо** от организации, которую представляет автор, **рецензия** или **экспертное заключение** (для аспирантов или соискателей ученой степени кандидата наук).

Иллюстрации:

1. **Рисунки** должны быть представлены отдельно в форматах файлов (под PC): **PDF, EPS, AI, CDR**;
2. **Фото** должны быть представлены для публикации в форматах файлов (под PC): **TIFF, JPG**;
3. **Разрешение** файлов – не менее **300 dpi**;
4. **Таблицы, схемы и диаграммы** должны быть встроены в статью и иметь связи (быть доступными для редактирования) с программой, в которой они созданы (**Excel**);
5. Обязательно наличие **подписей к иллюстрациям**, оформленных отдельным списком.
6. **Данные в таблицах** даются полностью **без сокращений**.
7. **Математические формулы и выражения** должны быть записаны в **Microsoft Word** или с помощью редактора **Microsoft Equation 3.0**.
8. **УДК статьи**.

Ждем ваши материалы по адресу:

109456, а/я 29, г. Москва
или по e-mail: **info@raee.su**,
т/ф.: **(499) 174–70–65**