



**А. Г. ТЯПИН**  
доктор технических наук

АО «Атомэнергoproject», г. Москва

УДК 624.042.7

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО АСИМПТОТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ РАСЧЕТА ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ: РОЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ОСНОВАНИЕМ

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 прошлой статье приведены результаты применения КАМ к расчету высотного сооружения на модельном однородном основании. В настоящей статье эти результаты анализируются с точки зрения вопроса о влиянии динамического взаимодействия с основанием на сейсмическую реакцию. Тот же вопрос можно переформулировать как вопрос о применимости расчета по схеме с защемленным фундаментом. Оказывается, этот вопрос следует ставить отдельно для горизонтально-качательных колебаний в двух вертикальных плоскостях, для вертикальных колебаний и для крутильных колебаний, если сооружение несимметрично. Роль SSI может быть разной (существенной или не существенной) для одного и того же сооружения в разных направлениях. Соответственно и метод расчета на защемленном фундаменте может быть применим в одних направлениях и не применим в других. Результаты проверялись по эмпирическим критериям применимости расчета на защемленном фундаменте, предлагаемым в атомных нормах. Они основаны на сравнении низших собственных частот податливого сооружения на жестком

основании и жесткого сооружения на податливом основании. Критерии подтверждаются полученными результатами, если проводить такое сравнение отдельно по направлениям. Если же проводить общее сравнение собственных частот, можно получить неправильный результат, и наш случай как раз дает тому показательный пример.

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

**В** статье [1] представлен большой объем результатов, относящихся к расчету сейсмической реакции высотного сооружения с учетом его взаимодействия с грунтовым основанием различной жесткости. В настоящей статье эти результаты обсуждаются и анализируются.

Первый и главный вопрос: существенно ли влияет взаимодействие с основанием (SSI) на сейсмическую реакцию рассматриваемого сооружения? Можно ли вообще пренебрегать им и рассчитывать сооружение по схеме защемленного фундамента? Ответ на этот вопрос получился неоднозначным: степень влияния SSI оказалась разной для разных компонент воздействия и реакции. Горизонтальные компоненты реакции фундамента не очень сильно отличаются от горизонтальных компонент воздействия на свободной по-

верхности (см. рис.10 и 11 в [1]). С другой стороны, за счет податливости грунтового основания у фундамента появились вращательные компоненты реакции. Крутильная компонента не очень велика, но качательные компоненты более существенны. Судя по всему, именно они ответственны за заметные (кое-где более 20%) отклонения интегральных горизонтальных сил и качательных моментов под подошвой фундамента, вычисленных с учетом SSI, от соответствующих усилий, вычисленных по схеме защемленного фундамента (см. таблицу 1 в [1]). Справедливости ради следует отметить, что эти отклонения во всех случаях привели к уменьшению максимальных по модулю усилий. Также стоит отметить, что во всех случаях смягчение основания привело к уменьшению интегральных усилий. Так что можно высказать осторожное предположение о том, что с точки зрения горизонтально-качательной реакции расчет по схеме защемленного фундамента является консервативным. Впрочем, это предположение нуждается в дополнительном обосновании.

Причины, по которым для рассмотренного очень тяжелого сооружения и сравнительно податливого основания эффекты SSI не проявляются так, как это происходит с сооружениями АЭС [2], заключаются в совершенно другой податливости рассматриваемого сооружения. Об этом пойдет речь дальше.

Совершенно другая ситуация наблюдается по вертикали, причем эта ситуация намного привычнее для расчетчиков АЭС. Уже в спектрах ускорений на фундаменте (см. рис.13 в [1]) мы видим заметное влияние податливости основания: на каких-то частотах заметен резонанс (см. также рис.10 в [1]), положение которого зависит от жесткости грунтового основания. В закритической области спектры вертикальных ускорений реакции меньше спектров ускорений воздействия. С точки зрения интегральных вертикальных усилий под подошвой фундамента (см. таблицу 1 в [1]) податливость основания за счет упомянутого резонанса может привести к тому, что расчет по схеме защемленного фундамента окажется неконсервативным. В нашем случае это произошло для наиболее жесткого из трех рассмотренных грунтовых оснований. Впрочем, степень неконсерватизма оказалась не очень большой.

Посмотрим, как такие выводы соответствуют критериям наличия или отсутствия взаимодействия сооружений с основанием, приведенным в атомном стандарте [3]. Напомним, что авторы [3] предлагают рассчитать собственные частоты в двух вариантах. Первый вариант – это собственные частоты сооружения на защемленном фундаменте. Они уже получены при модальном анализе модели сооружения на защемленном фундаменте и приведены в [1]: первые частоты, соответствующие горизонтально-качательным формам, составили в двух главных вертикальных плоскостях соответственно 0,109 и 0,111 Гц, первая частота, соответствующая вертикальной форме, составила около 1,587 Гц. Второй вариант расчета собственных частот – это расчет собственных частот сооружения как жесткого целого на грунтовых пружинах, описываемых формулами для штампа на однородном полупространстве. Идея состоит в сопоставлении низших собственных частот для первого и второго вариантов.

Проведем соответствующие расчеты для среднего из трех грунтов, рассмотренных в [1]. При заданных скоро-

стях продольных и поперечных волн в грунте  $V_p = 1300$  и  $V_s = 400$  м/с [1] сначала определим по их отношению коэффициент Пуассона  $\nu$  из соотношения:

$$\frac{V_p^2}{V_s^2} = \frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu} \quad (1)$$

Отсюда  $\nu = 0,4477$ , что вполне реально для водонасыщенных осадочных грунтов. Далее вычислим поступательные и качательные жесткости грунтовых пружин согласно табличным формулам [3]. Модуль сдвига грунта равен

$$G = \rho V_s^2 = 2 \times (400)^2 = 0,32 \times 10^6 \text{ кПа} \quad (2)$$

Безразмерные коэффициенты для квадратного фундамента ( $B = L = 40$  м) равны  $\beta_x = 1,01$ ;  $\beta_z = 2,17$ ;  $\beta_\psi = 0,52$  [3]. Горизонтальная жесткость основания для штампа равна [3]

$$k_x = 2(1 + \nu) G \beta_x \sqrt{BL} = 37,43 \times 10^6 \text{ кН/м} \quad (3)$$

Это значение можно сравнить со значением действительной части соответствующего импеданса, вычисленного по программе SASSI в [1]: там для наименьшей частоты оно составило 40,86Е6 кН/м.

Вертикальная жесткость основания для штампа равна

$$k_z = \frac{G}{(1 - \nu)} \beta_z \sqrt{BL} = 50,29 \times 10^6 \text{ кН/м} \quad (4)$$

Это значение можно сравнить со значением действительной части соответствующего импеданса, вычисленного по программе SASSI в [1]: там для наименьшей частоты оно составило 57,9Е6 кН/м.

Качательная жесткость основания для штампа равна

$$k_\psi = \frac{G}{1 - \nu} \beta_\psi BL^2 = 1,9282 \times 10^{10} \text{ кН} \times \text{м} \quad (5)$$

Это значение можно сравнить со значением действительной части соответствующего импеданса, вычисленного по программе SASSI в [1]: там для наименьшей частоты оно составило 2,16Е10 кН м.

Во всех трех случаях табличные значения несколько меньше вычисленных. Это не должно пугать – точные значения зависят от частоты, и табличные значения призваны описать эффективную жесткость основания.

Теперь оценим собственные частоты жесткого сооружения на вычисленных грунтовых пружинах, предположив для простоты, что колебания разделяются на горизонтально-качательные, вертикальные и крутильные. Начнем с вертикальной частоты. Напомним [1], что масса  $m$  сооружения в нашем случае составляет 0,2248Е6 т.

$$f_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_z}{m}} = 2,38 \text{ Гц} \quad (6)$$

Эту частоту авторы [3] предлагают сравнить с первой частотой собственных колебаний податливого сооружения на защемленном фундаменте (мы помним, что она равна 1,587 Гц). Если частота жесткого сооружения на грунтовых пружинах превышает частоту податливого сооружения на защемленном фундаменте более чем в два раза, эффекты SSI считаются несущественными. Мы видим, что в нашем случае это не так:  $2,38/1,587=1,5$ , что меньше двух. Это означает, что эффектами SSI в нашем случае пренебрегать нельзя, – и дей-

ствительно, мы видели [1], что в вертикальном направлении они существенны (по крайней мере, по спектрам вертикальных ускорений).

Теперь обратимся к горизонтально-качательным формам колебаний. Для начала оценим т.н. «парциальные» собственные частоты, т.е. частоты в предположении об одномерности колебаний. Для оценки горизонтальной парциальной частоты достаточно использовать аналог (6) с заменой вертикальной грунтовой жесткости на горизонтальную:

$$f_x = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_x}{m}} = 2,05 \text{ Гц} \quad (7)$$

По аналогии можно рассчитать парциальную частоту чисто качательных колебаний. Момент инерции относительно подошвы составляет  $6,9832\text{E}9 \text{ т м}^2$  (это данные из программы ABAQUS).

$$f_{yy} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\psi}}{I_{yy}}} = 0,2644 \text{ Гц} \quad (8)$$

Как видим, упрощенный расчет показывает, что качательная парциальная частота оказалась намного меньше, чем горизонтальная. При этом аномальной из этих двух частот является именно качательная: значение горизонтальной парциальной частоты 2,05 Гц (7) вполне привычно для расчетчиков АЭС.

Но это был упрощенный подход: он не учитывал связи между горизонтальными и качательными колебаниями. Этой связи нет в табличных формулах для жесткостей грунтовых пружин, но зато она есть в матрице инерции. Соответствующий элемент матрицы инерции равен  $M_{x,yy} = H_c m$ , где  $m$  – масса сооружения, а  $H_c$  – высота центра тяжести над подошвой фундамента, в нашем случае с учетом толщины плиты составляющая 146,58 м. Поэтому собственная частота связанных горизонтально-качательных колебаний должна определяться не по простым формулам (7,8), а из биквадратного уравнения (т.е. квадратного уравнения относительно квадрата неизвестного)

$$\det \begin{bmatrix} k_x - \omega^2 m & -\omega^2 M_{x,yy} \\ -\omega^2 M_{x,yy} & k_{\psi} - \omega^2 I_{yy} \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

Вычисления дают значение низшей частоты 0,26295 Гц. Оно чуть меньше меньшего из двух «парциальных» значений (7,8), как и должно быть по физическому смыслу. Отметим также, что частота связанных горизонтально-качательных колебаний (0,26295 Гц) оказалась почти равна парциальной частоте чисто качательных колебаний (0,2644 Гц), а парциальная частота чисто горизонтальных колебаний оказалась примерно в восемь раз больше (2,05 Гц). Это означает, что в первой форме горизонтально-качательных колебаний сооружения на грунтовых пружинах качание фундамента будет проявляться намного существеннее, чем его горизонтальное смещение.

Вернемся к критерию важности эффектов SSI. Полученную выше собственную частоту надо сравнить с низшей частотой податливого сооружения на защемленном фундаменте в той же вертикальной плоскости. Отношение частот

$0,26295/0,11179=2,352$  оказалось больше двух, хотя и не много. Это говорит о том, что влияние SSI на горизонтально-качательные колебания не очень велико, что подтверждается результатами [1]. С другой стороны, превышение порогового значения не очень большое (2,35 против 2,0), да и само пороговое значение имеет эмпирическую природу. Это объясняет, почему в горизонтальных силах и моментах под подошвой (см. таблицу 1 в [1]) разница между вариантом защемленного фундамента и вариантом сооружения на среднем грунте все-таки достаточно заметна. Расчет на защемленном фундаменте оказался консервативным, но называть его очень точным нельзя.

Автор хотел бы высказать свое отношение к описанным выше критериям. Если присмотреться к ним внимательнее, то в них участвует динамическая инерция верхнего строения (определяемая податливостью и инерционностью верхнего строения) и податливость основания. Но все это относится к т.н. «инерционному взаимодействию» сооружения с основанием. Иными словами, на самом деле обсуждается вопрос, насколько колебания фундамента под инерционным сооружением будут отличаться от колебаний невесомого фундамента в отсутствие сооружения. При этом ничего не говорится о том, насколько колебания невесомого фундамента в отсутствие сооружения отличаются от колебаний свободной поверхности основания – это т.н. «кинематическое взаимодействие» сооружения с основанием. Если, как в нашем случае, фундамент – это просто жесткий штамп на поверхности горизонтально-слоистого (в нашем случае – вообще однородного) полупространства, то при вертикальной сейсмической волне невесомый жесткий поверхностный фундамент движется точно так же, как свободная поверхность основания, т.е. кинематическое взаимодействие никак не проявляется. Это соответствует и описанному выше подходу авторов норм [3], в которых формулы для жесткости основания в критериях взяты из решения задач о жестком штампе на поверхности полупространства. В этом простейшем случае все взаимодействие сооружения с основанием сведется к инерционному взаимодействию. Так что претензий к авторам [3] здесь нет.

Однако в реальном мире, как уже отмечалось в [1], никто не станет возводить высотное здание на нескальных грунтах без свай и без развитой подземной части. В этом случае кинематическое взаимодействие сооружения с основанием проявится существенно. Что будет с критериями, описанными выше? Жесткость основания можно посчитать и для заглубленного фундамента на сваях – приведенные выше простые формулы уже непригодны, но их можно заменить решением контактных задач. Получившиеся значения жесткостей будут больше тех, которые рассчитаны для поверхностного штампа. Это означает, что по горизонтали (а может быть, и по вертикали) приведенные выше критерии дадут отрицательный ответ о важности взаимодействия с основанием. Однако физический смысл этого ответа будет другим – такой ответ будет означать, что возведение податливого здания на фундаменте не поменяло колебания фундамента. Однако сами эти колебания фундамента будут отличаться от колебаний свободной поверхности основания в отсутствие сооружения из-за заглубления и наличия свай – здесь как раз проявится роль именно кинематического вза-

имодействия, о котором в критериях ничего не говорилось.

Напрашивается предложение (нуждающееся в проверке) о двухэтапном расчете. Сначала на первом этапе рассматривается только подземная часть – грунты, сваи и подвал. Исходное сейсмическое воздействие, заданное на свободной поверхности основания, пересчитывается к колебаниям фундаментной плиты. На втором этапе проводится стандартный расчет сооружения на защемленном фундаменте, но в качестве воздействия на фундамент вместо исходного воздействия, взятого со свободной поверхности основания, подается результат расчетов на первом этапе.

Другими словами, мы пришли к тому, что в предположении о жесткой фундаментной плите на заключительном этапе во всех случаях допустимо применять расчет по схеме защемленного фундамента. Весь вопрос в том, откуда брать движение этого фундамента, задаваемое в качестве кинематического воздействия (в альтернативном подходе – участвующее в определении сейсмических инерционных нагрузок). Здесь существуют три возможные ситуации. В самом простом случае это движение считается совпадающим с движением поверхности свободного основания, которое задается сейсмологами. В сущности, это подход общегражданских норм, соответствующий отсутствию эффектов взаимодействия сооружения с основанием. Вторая ситуация разбиралась только что. Движение фундамента отличается от движения свободной поверхности основания, но не зависит от свойств и вообще от наличия верхнего строения, а определяется заглублением фундамента и наличием свай. В этом случае проявляется одна из двух составляющих взаимодействия сооружения с основанием, а именно кинематическое взаимодействие. Наконец, третья ситуация, типичная для расчетов сооружений АЭС, заключается в том, что движение фундамента зависит и от подземной части, и от свойств верхнего строения. Эта ситуация применения комбинированного асимптотического метода.

Сделаем еще один комментарий. Как показано в [1], спектры горизонтальных колебаний фундамента в вариантах с защемленным фундаментом и с податливым основанием различаются совсем ненамного. Но качательные колебания фундамента, которых не было в расчете с защемленным фундаментом, приводят не только к появлению дополнительных качательных моментов, но и к появлению дополнительных горизонтальных усилий под фундаментной плитой. Поэтому разница между горизонтальными усилиями в разных вариантах основания намного больше, чем разница между горизонтальными ускорениями плиты в тех же вариантах основания.

Главный вывод из проделанного в настоящей статье анализа следующий. Критерии важности эффектов взаимодействия с основанием (иными словами, критерии при-

менимости расчета по схеме защемленного фундамента, где взаимодействие с основанием не учитывается), которые содержатся в атомных нормах, для рассмотренного высотного сооружения в целом подтвердились. Однако выяснилось, что их следует применять отдельно для горизонтально-качательных колебаний в двух вертикальных плоскостях, для вертикальных колебаний и для крутильных колебаний, если сооружение несимметричное. Дело в том, что роль взаимодействия с основанием (SSI) может быть разной (существенной или не существенной) для одного и того же сооружения в разных направлениях. Соответственно и метод расчета на защемленном фундаменте может быть применим в одних направлениях и неприменим в других. Если же проводить общее сравнение собственных частот, можно получить неправильный результат, и наш случай как раз дает тому показательный пример. Действительно, если сравнивать низшие собственные частоты, не обращая внимания на их физический смысл, то мы на практике будем сравнивать только горизонтально-качательные частоты (см. выше). Для них критерий отношения частот выполняется (это отношение больше двух), и мы сделаем вывод об отсутствии необходимости учитывать взаимодействие с основанием. При этом мы упустим существенное влияние SSI на вертикальные колебания, так что сделанный вывод будет ошибочным.

Что делать, если в каком-то направлении эффекты SSI оказались значимыми, а в других направлениях – нет (как в нашем случае)? Простейший ответ – учитывать SSI во всех направлениях. Однако если расчет проводится на три компоненты воздействия по очереди, то возможен вариант, когда расчет на горизонтальные компоненты выполняется по схеме защемленного фундамента, что позволит не проводить второй раз модальный анализ сложной модели с учетом податливости основания. Что касается вертикальной составляющей воздействия, то возможен упрощенный расчет. Впрочем, это заслуживает отдельного обсуждения.

Еще один вывод заключается в том, что рассмотренные критерии важности взаимодействия сооружения с основанием не затрагивают кинематического взаимодействия, т.е. изменения движения фундамента в отсутствие сооружения по сравнению с движением свободной поверхности основания. Такое изменение может быть существенным при наличии свай и при заглублении фундамента. Поэтому даже в том случае, когда рассмотренные критерии говорят о малой важности взаимодействия, надо дополнительно проверять, насколько изменилось движение фундамента после устройства подземной части.

Однако этим нетривиальные выводы из проделанного в [1] расчета не ограничиваются. Автор планирует продолжить обсуждение в следующих публикациях.

## Литература

1. Тяпин А.Г., Топорков А.С., Михайлов В.С. Применение комбинированного асимптотического метода для расчета высотного здания на сейсмическое воздействие: результаты // Сейсмостойкое строительство. Безопас-

ность сооружений. 2018. №4. С.32-43.

2. Тяпин А.Г. Учет взаимодействия сооружений с основанием при расчетах на сейсмические воздействия. Руководство по расчетам. М.: Издательство АСВ. 2014. 136 с.

3. *Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear*

*Structures and Commentary. ASCE/SEI 4-16. Reston, Virginia, USA. 2017.*

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



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

## COMBINED ASYMPTOTIC METHOD IN SEISMIC ANALYSIS OF HIGH-RISE BUILDING: IMPACT OF SSI

### 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. In the previous paper the authors applied CAM to the seismic analysis of the high-rise structure resting on a sample homogeneous half-space modeling soil. In the present paper the results are investigated to estimate the overall impact of SSI or, in other words, the applicability of the fixed-base seismic analysis. It turns out that this question must be asked separately for separate directions of seismic response - horizontal & rocking in two different vertical

planes, vertical, and torsional (for non-symmetrical structures). Impact of SSI may be different for one and the same structure in different directions. Hence, fixed-base seismic analysis may be applicable in some directions and non-applicable in others. The results were checked against empirical criteria from nuclear ASCE Standard, based on the comparison of the first natural frequencies of flexible structure resting on rigid soil and of rigid structure resting on flexible soil. Criteria were confirmed, if the comparison is performed separately for different directions. Otherwise, if the comparison is performed for the whole set of frequencies, one can get wrong result. The considered case gives an example of such a situation.

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

### References

1. Tyapin. A.G., Toporkov A.S., Mikhailov V.S. Application of the Combined Asymptotic Method to seismic analysis of high-rise building: results // Seismostoitkoe stroitel'stvo.

Bezopasnost' sooruzhenii [Earthquake engineering. Constructions Safety]. 2018. №4. Pp. 32-43. (In Russian)

2. Tyapin A.G. Seismic analysis of structures considering soil-structure interaction. Manual

for analysis. Moscow: ASV. 2014. 136 p. (In Russian)

3. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary. ASCE/SEI 4-16. Reston, Virginia, USA. 2017.

**Для цитирования:** Тяпин А.Г. Применение комбинированного асимптотического метода для расчета высотного здания на сейсмическое воздействие: роль взаимодействия с основанием // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 5. С. 24-28.

**For citation:** Tyapin A.G. Combined asymptotic method in seismic analysis of high-rise building: impact of SSI // Seismostoitkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii [Earthquake engineering. Constructions safety], 2018, no. 5, pp. 24-28. (In Russian).

## КНИЖНЫЕ НОВИНКИ

### Тяпин А. Г. СОВРЕМЕННЫЕ НОРМАТИВНЫЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ ОТВЕТСТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

М.: Издательство АСВ, 2018. 518 с.



В издательстве АСВ вышла в свет четвертая монография д. т. н. А.Г. Тяпина, на этот раз посвященная новым тенденциям в американских нормах расчета сооружений ядерных объектов на сейсмические воздействия. В 2017 году опубликована новая редакция стандарта ASCE4-16. Зная ту огромную роль, которую сыграла предыдущая редакция этого стандарта (ASCE4-98), автор полагает, что в ближайшие годы новая редакция также станет индустриальным стандартом по всему миру. С учетом большого количества зарубежных проектов Росатома, отечественным специалистам важно знать, какие новшества появились в новой редакции, чтобы работать с зарубежными заказчиками. Кроме того, ряд уникальных гражданских сооружений уже сопоставим с сооружениями

ядерных объектов по своим размерам, жесткостям и массам, поэтому нормы атомной отрасли в части сейсмических расчетов могут, по мнению автора, использоваться и для подобных гражданских объектов. Сравнительный анализ новых нормативных документов и документов прежнего поколения, проводимый автором в данной монографии, представляет интерес для студентов и аспирантов, готовящихся к работе в этой отрасли, а также для преподавателей строительных ВУЗов. По вопросам заказа монографии можно обращаться в издательство АСВ E-mail: iasv@iasv.ru, тел. 8(925)084-74-24.