

УДК 699.841

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-89-97](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-89-97)

СЕЙСМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЗДАНИЙ АЭС С УЧЕТОМ ПОДАТЛИВОСТИ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ПЛИТЫ

В.А. КОРОТКОВ^{1,✉}, канд. техн. наукТ.З. ЮГАЙ²¹АО «Атомэнергoproject», ул. Бакунинская, д. 7, к. 1, г. Москва, 107996, Российская Федерация²ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» Ростехнадзора, Малая Красносельская ул., д. 2/8, к. 5, г. Москва, 107140, Российская Федерация

В настоящей работе предлагается математический метод учета податливости фундаментных плит зданий АЭС при динамических воздействиях. Подобный учет во многих случаях анализа позволяет существенно уточнить результаты, а иногда (для конструкций с «отрезанными» внешними стенами) при падении самолета и воздействии воздушной ударной волны он просто необходим.

Представленный метод базируется на применении «грунтовых» пружин и демпферов из ASCE 4-16, специальным образом распределенных по подошве фундаментной плиты здания.

В заключение представлены результаты расчета интегральных характеристик «грунтовых» пружин и демпферов при реалистичном (седловидном) законе их распределения по подошве фундаментной плиты типового здания.

Ключевые слова: взаимодействие сооружения с основанием, податливость фундаментной плиты, эквивалентные жесткости и затухания, скорректированные затухания, штамп

Для цитирования: Коротков В.А., Югай Т.З. Сейсмический расчет зданий АЭС с учетом податливости фундаментальной плиты // Вестник НИЦ «Строительство». 2021. Т. 31. № 4. С. 89–97. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-89-97](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-89-97)

Вклад авторов

Коротков В.А. – разработка метода, участие в написании статьи. Югай Т.З. – участие в написании статьи, анализ результатов.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

SEISMIC DESIGN OF NPP STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT FOUNDATION SLAB COMPLIANCE

V.A. KOROTKOV^{1,✉} Cand. Sci. (Engineering)T.Z. YUGAI²¹Atomenergoproekt JSC, Bakuninskaya str., 7, bld. 1, Moscow, 107996, Russian Federation²Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Malaya Krasnoselskaya str., 2/8, bld. 5, Moscow, 107140, Russian Federation

The present article proposes a mathematical method for factoring in the compliance of foundation slabs in NPP structures under dynamic loading. In many cases, such an approach allows the analysis results to be significantly improved, whereas sometimes it is simply a necessary part of the procedure, i.e., when structures having “detached” exterior walls are exposed to an air shock wave generated by an aircraft crash.

The presented method applies soil springs and dampers as per ASCE 4-16, specially distributed along the foundation slab bottom of a building.

The conclusion presents the results of calculating the integral characteristics of soil springs and dampers according to the realistic (saddle-shaped) law of their distribution along the foundation slab bottom of a typical building.

Keywords: soil-structure interaction, foundation slab compliance, equivalent stiffness and damping, adjusted damping, plate

For citation: Korotkov V.A., Yugai T.Z. Seismic design of NPP structures taking into account foundation slab compliance. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2021. Vol. 31. No. 4. P. 89–97 (In Russ.). doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-89-97](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-89-97)

Author contribution statements

V.A. Korotkov: method development and writing of the article. T.Z. Yugai: writing of the article and analysis of results.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

При выполнении сейсмических расчетов в соответствии со стандартом ASCE 4-16 [1] необходимо учитывать эффекты взаимодействия сооружения с грунтовым основанием (SSI) зданий и сооружений АЭС, важных для безопасности. Существуют два основных метода решения данной задачи: прямой метод и метод импедансов. В прямом методе грунт моделируется детально элементами сплошной среды, а в методе импедансов применяются «грунтовые» пружины и демпферы, моделирующие эквивалентную жесткость и затухание. Метод импедансов является эффективным, удобным и часто применяется в расчетах по различным программам: ABAQUS, ANSYS, NASTRAN и др. для проектных целей. Однако эквивалентные характеристики пружин и демпферов определяются для штампа и их использование для реальных зданий АЭС, обладающих податливой фундаментной плитой, возможно только приближенно. Также приближенно учитываются неоднородности в грунте (слоистость, линзы и др.). При выполнении реальных расчетов компенсация названных приближений производится за счет учета вариабельности модуля сдвига в грунте по рекомендациям ASCE 4–16, п. 5.1.7. Для учета податливости фундаментной плиты необходимо выполнить реалистическое распределение эквивалентных жесткостей и затуханий по точкам ее подошвы таким образом, чтобы суммарная по всем точкам распределения жесткость в точности соответствовала эквивалентной жесткости. Суммарное затухание также должно соответствовать эквивалентным затуханиям либо консервативно быть несколько меньше.

В настоящей работе предлагается математический метод решения такой задачи.

Система уравнений движения при сейсмических колебаниях здания имеет вид:

$$[K]U + [C]\dot{U} + [M]\ddot{U} = -[M]\ddot{U}_0, \quad (1)$$

где

$[K]$ – матрица жесткости;

$[C]$ – матрица демпфирования;

$[M]$ – матрица массы;

U, \dot{U}, \ddot{U} – векторы относительных перемещений, скоростей и ускорений;

\ddot{U}_0 – исходная акселерограмма.

В системе уравнений (1)

$$[K] = [K_1] + [K_2], \quad (2)$$

где $[K_1]$ и $[K_2]$ – парциальные матрицы жесткости сооружения и грунта соответственно;

$$[C] = [C_1] + [C_2], \quad (3)$$

где $[C_1]$ – парциальная матрица демпфирования в материале системы, возникающего за счет трения, $[C_2]$ – парциальная матрица излучательного или волнового демпфирования, обусловленная оттоком энергии в грунт при колебаниях здания.

Для определения $[K_2]$ и $[C_2]$ использовались эквивалентные жесткости и затухания из ASCE 4-16. Обозначим $K_{\text{эКВ}} = \{K_x, K_y, K_z, K_{\text{фх}}, K_{\text{фy}}, K_{\text{фz}}\}$ и $C_{\text{эКВ}} = \{b_x, b_y, b_z, b_{\text{фх}}, b_{\text{фy}}, b_{\text{фz}}\}$ компоненты эквивалентной жесткости и эквивалентного затухания для штампа, показанного на рис. 1. Для формирования матриц $[K_2]$ и $[C_2]$ величины $K_{\text{эКВ}}$ и $C_{\text{эКВ}}$ нужно распределить по точкам подошвы фундаментной плиты.

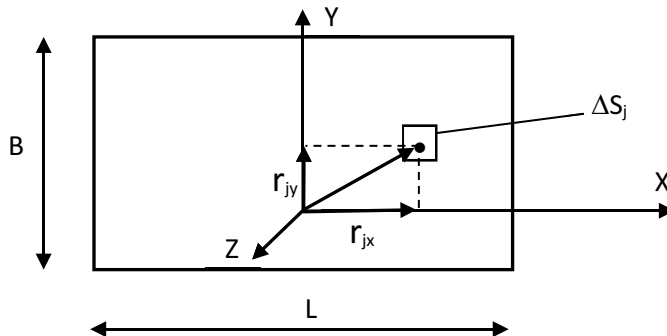


Рис. 1. Прямоугольный штамп
Fig. 1. Rectangular plate

Пусть значения эквивалентных поступательных жесткостей и затуханий при поступательных перемещениях распределяются по произвольному закону $z = f(x, y)$.

Тогда для j -й точки фундаментной плиты выражение для приведенной эквивалентной жесткости можно записать следующим образом:

$$K_{ij} = c_i f_{ij}(x, y) S_j, \text{ где } i - x, y, z, \quad (4)$$

$j = 1, \dots, N$, N – число узловых точек на подошве плиты,

c_i – константа,

$f_{ij}(x, y)$ – значение функции $f(x, y)$ в точке j по направлению i ,

ΔS_j – приведенная к точке j площадь фундаментной плиты.

Величину константы c_i определим из условия:

$$\sum_j c_i f_{ij}(x, y) \Delta S_j = K_i. \quad (5)$$

Отсюда:

$$c_i = \frac{K_i}{\sum_j f_{ij}(x, y) \Delta S_j}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получаем:

$$K_{ij} = \frac{K_i f_{ij}(x, y) \Delta S_j}{\sum_j f_{ij}(x, y) \Delta S_j}. \quad (7)$$

Формула (7) позволяет определить значение поступательной компоненты жесткости в j -й точке фундаментной плиты при произвольном законе распределения по подошве.

Аналогичное выражение для поступательных компонент затухания:

$$b_{ij} = \frac{b_i f_{ij}(x, y) \Delta S_j}{\sum_j f_{ij}(x, y) \Delta S_j}. \quad (8)$$

Из соотношений (7) и (8) получим:

$$\sum_j K_{ij} = K_i, \quad \sum_j b_{ij} = b_i, \quad (9)$$

т. е. суммарные (интегральные) поступательные компоненты жесткости и затухания по всем точкам подошвы фундаментной плиты в точности соответствуют эквивалентным значениям.

Из (7) и (8) получаем частный случай равномерного распределения эквивалентных поступательных жесткостей и затуханий, при $f(x,y) = 1$

$$K_{ij} = K_i \frac{\Delta S_j}{S}; \quad b_{ij} = b_i \frac{\Delta S_j}{S}, \quad (10)$$

где $S = B \cdot L$.

Для распределения величин эквивалентных поступательных жесткостей использовалось реалистичное выражение для $f(x,y)$, имеющее «седловидный» характер.

«Седловидное» распределение жесткостей производилось по формуле (420) [2] для реактивных давлений:

$$f(x,y) = \left(\begin{aligned} &a_{00} + a_{20}x^2 + a_{02}y^2 + a_{40}x^4 + a_{22}x^2y^2 + \\ &+ a_{04}y^4 + a_{60}x^6 + a_{42}x^4y^2 + a_{24}x^2y^4 + a_{06}y^6 \end{aligned} \right) P_0 / S, \quad (11)$$

где P_0 – сила.

Коэффициенты уравнения a_i, a_j определялись в зависимости от соотношения сторон фундаментной плиты L / B , a_{00} – реактивное давление в центре плиты. Эти коэффициенты при нагружении сосредоточенной силой P_0 (в долях P_0 / S) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов при нагружении сосредоточенной силой P_0

Table 1

Values of the coefficients under concentrated force loading P_0

L/B	a_{00}	a_{20}	a_{02}	a_{40}	a_{22}	a_{04}	a_{60}	a_{42}	a_{24}	a_{06}
1	0.556	0.267	0.267	0.3	-0.017	0.301	0.501	0.032	0.032	0.501
1.5	0.561	0.223	0.301	0.268	0.015	0.319	0.470	-0.060	0.126	0.530
2	0.565	0.196	0.322	0.234	0.029	0.332	0.433	-0.054	0.129	0.550
3	0.581	0.161	0.339	0.185	0.061	0.345	0.353	0.020	0.130	0.567
5	0.597	0.134	0.355	0.139	0.078	0.356	0.247	0.074	0.118	0.593
7	0.607	0.120	0.363	0.115	0.074	0.363	0.196	0.090	0.113	0.606
10	0.616	0.108	0.369	0.094	0.069	0.370	0.155	0.102	0.105	0.616

Узловые эквивалентные поступательные жесткости и затухания в совокупности создают интегральную угловую жесткость и затухание за счет вращения:

$$\left. \begin{aligned} C_{\varphi x} &= \sum_j K_{zj} r_{jy}^2 \\ C_{\varphi y} &= \sum_j K_{zj} r_{jx}^2 \\ C_{\varphi z} &= \sum_j (K_{xj} r_{jy}^2 + K_{yj} r_{jx}^2) \\ D_{\varphi x} &= \sum_j b_{zj} r_{jy}^2 \\ D_{\varphi y} &= \sum_j b_{zj} r_{jx}^2 \\ D_{\varphi z} &= \sum_j (b_{xj} r_{jy}^2 + b_{yj} r_{jx}^2) \end{aligned} \right\} . \quad (12)$$

Здесь r_{jx} и r_{jy} – компоненты радиус-вектора j -й точки, выходящего из геометрического центра фундаментной плиты (рис. 1).

Интегральные угловые жесткости и затухания из (12) существенно отличаются от эквивалентных. Следует отметить, что если расчет эквивалентных и интегральных характеристик грунта проводить по теории Винклера, учитывающей проседание грунта только под штампом, но не в соседних зонах (рис. 2), то отличия не будет.

Компенсирующая разница в угловых жесткостях и затуханий составит:

$$\Delta C_{\varphi x} = K_{\varphi x} - C_{\varphi x}$$

$$\Delta b_{\varphi x} = b_{\varphi x} - D_{\varphi x}$$

$$\Delta C_{\varphi y} = K_{\varphi y} - C_{\varphi y}$$

$$(13.1)$$

$$\Delta b_{\varphi y} = b_{\varphi y} - D_{\varphi y}$$

$$(13.2)$$

$$\Delta C_{\varphi z} = K_{\varphi z} - C_{\varphi z}$$

$$\Delta b_{\varphi z} = b_{\varphi z} - D_{\varphi z}$$

Как показали расчетные исследования на типовых конструкциях значения компенсирующих угловых жесткостей (13.1) положительные, а значения компенсирующих угловых затуханий (13.2) отрицательные. Консервативно принимаем:

$$\Delta b_{\varphi x} = \Delta b_{\varphi y} = \Delta b_{\varphi z} = 0 . \quad (14)$$



Рис. 2. Зоны проседания грунта под штампом
Fig. 2. Soil subsidence areas under the plate

Из (14) получаем выражения для скорректированных эквивалентных затуханий:

$$\bar{b}_{z_1} = \frac{b_{\varphi x}}{\sum_j \frac{\Delta S_j}{S} r_{iy}^2}; \quad (15)$$

$$\bar{b}_{z_2} = \frac{b_{\varphi y}}{\sum_j \frac{\Delta S_j}{S} r_{ix}^2}; \quad (16)$$

$$\bar{b}_x = \bar{b}_y = \frac{b_{\varphi z}}{\sum_j \left(\frac{\Delta S_j}{S} r_{iy}^2 + \frac{\Delta S_j}{S} r_{jx}^2 \right)}. \quad (17)$$

Консервативно принимаются минимальные значения из \bar{b}_{z_1} и \bar{b}_{z_2} .

Если $\bar{b}_{z_1} < \bar{b}_{z_2}$, $\bar{b}_z = \bar{b}_{z_1}$

$$\bar{D}_{\varphi x} = \sum_j \bar{b}_{z_1} \cdot r_{jy}^2 = \sum_j \bar{b}_z \cdot \frac{\Delta S_j}{S} r_{jy}^2 = \sum_j \frac{b_{\varphi x}}{\sum_j \frac{\Delta S_j}{S} r_{jy}^2} \cdot \frac{\Delta S_j}{S} \cdot r_{jy}^2 = b_{\varphi x}$$

$$\bar{D}_{\varphi y} = \sum_j \bar{b}_{z_1} \cdot r_{jx}^2 = \sum_j \bar{b}_z \cdot \frac{\Delta S_j}{S} r_{jx}^2 = \sum_j \frac{b_{\varphi x}}{\sum_j \frac{\Delta S_j}{S} r_{jy}^2} \cdot \frac{\Delta S_j}{S} \cdot r_{jx}^2 = b_{\varphi y} \cdot \frac{\bar{b}_{z_1}}{\bar{b}_{z_2}}$$

$$\bar{D}_{\varphi z} = \sum_j (\bar{b}_{jx} \cdot r_{jy}^2 + \bar{b}_{jy} \cdot r_{jx}^2) = \sum_j \bar{b}_x \left(\frac{\Delta S_j}{S} \cdot r_{jy}^2 + \frac{\Delta S_j}{S} \cdot r_{jx}^2 \right) = b_{\varphi z}$$

В результате: если $\bar{b}_{z_1} < \bar{b}_{z_2}$

$$\bar{D}_{\varphi x} = b_{\varphi x}$$

$$\bar{D}_{\varphi y} = b_{\varphi y} \cdot \frac{\bar{b}_{z_1}}{\bar{b}_{z_2}} < b_{\varphi y}$$

$$\bar{D}_{\varphi z} = b_{\varphi z}$$

$$\bar{D}_{\varphi x} = b_{\varphi x} \cdot \frac{\bar{b}_{z_2}}{\bar{b}_{z_1}} < b_{\varphi x}$$

$$\bar{D}_{\varphi y} = b_{\varphi y}$$

$$\bar{D}_{\varphi z} = b_{\varphi z}$$

(18)

Если $L = B$, все скорректированные вращательные затухания равны эквивалентным.

Отметим, что $(\bar{D}_{\varphi x}, \bar{D}_{\varphi y}, \bar{D}_{\varphi z})$ рассчитываются на основе $(\bar{b}_x, \bar{b}_y, \bar{b}_z)$.

Таким образом, компоненты эквивалентных поступательных жесткостей, полученные по (7), распределяются по подошве фундаментной плиты по «седловидному» закону, а компенсирующие угловые жесткости, полученные по (13.1) – равномерно.

По предложенной методике была составлена программа, совместная с ПС ABAQUS, и выполнен ряд проектных расчетов. Результаты расчетов приводились в докладе на конференции [3].

Скорректированные компоненты эквивалентных поступательных затуханий (15), (16), (17) в совокупности создадут интегральные угловые затухания и, как видно из (18), их величины, в зависимости от соотношения сторон штампа, в точности соответствуют эквивалентным, либо будут несколько ниже.

В табл. 2 представлен пример расчета значений жесткости и затуханий в грунте по данной методике для типового здания. Размеры фундамента здания составляют $L = 73$ м, $B = 50$ м, а общая масса здания – 110 т.

Из табл. 2 видно, что компенсирующие угловые жесткости имеют существенные значения и их необходимо учитывать, а компоненты скорректированных интегральных затуханий либо соответствуют эквивалентным значениям затуханий, либо консервативно ниже.

Представленный метод учета податливости фундаментной плиты можно применять в расчетах зданий при особых динамических воздействиях: сейсмика, падение самолета и действие воздушной ударной волны с использованием различных методов анализа.

Также предлагается использовать данный подход в стандарте РФ по сейсмостойкости зданий.

Таблица 2

Пример расчета грунтовых характеристик
для типового здания

Table 2

Example of soil characteristics calculated
for a typical building

Эквивалентные жесткости, кН/м, кН·м		Эквивалентные затухания, кН·с/м, кН·с·м		Скорректированные интегральные затухания, кН·с/м, кН·с·м	
G _{min} , V _{S30} = 927 м/с					
K _x ,	3.44E + 08	b _x	7.22E + 06 (59 %)	\bar{b}_x	4.98E + 06 (41 %)
K _y ,	3.64E + 08	b _y	7.65E + 06 (60 %)	\bar{b}_y	4.98E + 06 (40 %)
K _z	4.13E + 08	b _z	1.28E + 07 (95 %)	\bar{b}_z	9.53E + 06 (71 %)
K _{φx}	2.65E + 11	b _{φx}	2.14E + 09 (25 %)	$\bar{b}_{\phi x}$	2.14E + 09 (25 %)
K _{φy}	4.55E + 11	b _{φy}	4.90E + 09 (37 %)	$\bar{b}_{\phi y}$	4.23E + 09 (32 %)
K _{φz}	5.24E + 11	b _{φz}	3.33E + 09 (27 %)	$\bar{b}_{\phi z}$	3.33E + 09 (27 %)
Компенсирующие угловые жесткости, кН·м					
ΔC _{φx}	9.845·10 ¹⁰				
ΔC _{φy}	2.443·10 ¹¹				
ΔC _{φz}	1.991·10 ¹¹				

Список литературы

1. ASCE 4–16 Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures. – American Society of Civil Engineers (ASCE), 2017. – 202 p.
2. Горбунов-Посадов М.И. Расчет конструкций на упругом основании / М.И. Горбунов-Посадов, Т.А. Маликова, В.И. Соломин. – Москва: Стройиздат, 1984. – 679 с.
3. Коротков В.А. О применимости модального метода динамического анализа в расчётах строительных конструкций АЭС при падении самолета и при сейсмическом воздействии / В.А. Коротков, А.П. Иванов // Инженерные системы–2016: Труды Международного форума (Москва, 4–5 апреля 2016 г.) / Инжиниринговая компания «ТЕСИС». – М.: МАКС Пресс, 2016. – С. 94–105.

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Анатольевич Коротков*, канд. техн. наук, главный специалист БКП-2 АО «Атомэнергoproject», Москва

e-mail: Korotkov_VA@aep.ru

Vladimir A. Korotkov,* Cand. Sci. (Engineering), Leading specialist, Comprehensive Design Group No 2, Atomenergoproekt JSC, Moscow

e-mail: Korotkov_VA@aep.ru

Тамара Захаровна Югай, старший научный сотрудник ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» Ростехнадзора, Москва

Tamara Z. Yugai, Senior researcher, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author