

Разработка и обоснование пространственной механической модели основания сооружений с приведенными расчетными характеристиками грунтов с учетом конечной жесткости фундаментных конструкций

А.Е.Саргсян, Атомэнергопроект, Москва

Е.Г.Гукова, Атомэнергопроект, Москва

Предложена и обоснована новая пространственная механическая динамическая модель оснований сооружений атомных станций.

В настоящее время при выполнении практических расчётов широко применяется модель оснований сооружений атомных станций, приведённая в [1]. В этой модели мгновенные жёсткости основания при вращательных движениях жёсткого невесомого штампа функционально зависят от массы сооружения и от моментов инерции масс сооружения относительно координатных осей, что противоречит физической сути понятия мгновенных жёсткостей основания при вращательных движениях жёсткого невесомого штампа на поверхности инерционного полупространства.

В свете вышеизложенного разработка динамической механической модели основания, устраняющей упомянутые несоответствия, представляется важной задачей, имеющей несомненную научную и практическую ценность

Для обоснования проектных решений фундаментных конструкций сооружений необходимо определить величины внутренних усилий, возникающих в их сечениях. При учёте конечной жёсткости фундаментных конструкций с применением метода конечных элементов необходимо установить закон распределения квазистатических и мгновенных жёсткостей грунтов основания по подошве фундаментной плиты.

Известно, что параметры модели основания по существу должны имитировать параметры реакции основания жёсткого невесомого штампа при его единичных смещениях и скоростях (линейных и угловых) по и относительно координатных осей.

В работе определены и обоснованы параметры модели основания, закон распределения интегральных жёсткостей по поверхности контакта. На примере сопоставления расчётов систем реакторного отделения совместно с основаниями, параметры которых были установлены по [1; 2], обоснована достоверность предлагаемой модели.

Ключевые слова: механическая динамическая модель основания сооружения, учёт конечной жёсткости фундаментных конструкций, штамп, контактная задача, распределение напряжений по поверхности контакта, пространственная модель, система «основание–сооружение».

Development and Justification of a Spatial Mechanical Model of the Foundation of Structures with the Given Design Characteristics of Soils, Taking into Account the Final Stiffness of the Foundation Structures

A.E.Sargsyan, Atomenergoproekt, Moscow

E.G.Gukova, Atomenergoproekt, Moscow

To determine the magnitude of the internal forces in sections it is necessary to justify the design of the foundations of structures. Considering the flexibility of the foundation using the finite element method it is necessary to establish the law of distribution of quasistatic and viscous stiffness of the soil base on the bottom of the foundation slab.

Parameters of the base model should essentially simulate the reaction parameters of the base of a rigid weightless stamp with its unit displacements and speeds (linear and angular) along and relative to the coordinate axes.

The parameters of the foundation and the law of the distribution of integral stiffness on the contact surface are determined and justified. By the comparing the analysis of RO soil–structure systems with parameters established according to [1] and [2], the reliability of the developed model is substantiated.

A new 3D mechanical dynamic model of the foundations of nuclear power plant structures is proposed and approved.

Nowadays the model of the nuclear power plant structures foundations given in ASCE 4-98 is widely used. There is a dependence between the viscous stiffness of the foundation and mass and inertia moments of the structure during rotational movements of a rigid weightless stamp on the surface of an inertial half-space in this model. This contradicts the physical essence of the concept of viscous stiffness.

In the light of the foregoing, the development of a dynamic mechanical model of a foundation that eliminates the aforementioned discrepancies seems to be an important task of undoubted scientific and practical value.

Keywords: mechanical dynamic model of the foundation of the structure, accounting for the flexibility of the foundation slab, stamp, contact, stress distribution on the contact surface, 3D model, soil-structure system.

В настоящее время как в России, так и за рубежом при выполнении практических расчётов широко применяется

динамическая механическая модель оснований сооружений атомных станций, рекомендованная в [1].

В [2] была разработана и обоснована новая механическая динамическая модель основания сооружения.

Необходимость разработки новой механической динамической модели была обусловлена следующими соображениями.

Известно, что параметры модели основания по существу должны имитировать параметры реакции основания жёсткого невесомого штампа при его единичных смещениях и скоростях (линейных и угловых) относительно координатных осей. При этом начало декартовой системы координат должно быть помещено в центр подошвы штампа, горизонтальные оси направлены по главным геометрическим осям инерции подошвы штампа.

Однако мгновенные жёсткости основания при вращательных движениях жёсткого невесомого штампа, рекомендованные [1], функционально зависят от массы сооружения и от моментов инерции масс сооружения относительно координатных осей.

Данное обстоятельство противоречит физической сути понятия мгновенных жёсткостей основания при вращательных движениях жёсткого невесомого штампа на поверхности инерционного полупространства.

Для обоснования проектных решений фундаментных конструкций сооружений необходимо определить внутренние усилия в сечениях. При учёте конечной жёсткости фундаментных конструкций с применением метода конечных элементов необходимо установить закон распределения квазистатических и мгновенных жесткостей грунтов основания по подошве фундаментной плиты.

В настоящее время при выполнении практических расчётов чаще всего интегральные жёсткости k_x, k_y, k_z равномерно распределяют по подошве фундаментной плиты. Это равносильно введению предположения, что плита расположена на упрощённом винклеровском основании. Только в данном случае справедливо применение правила о равномерном распределении интегральных жёсткостей по подошве фундаментной плиты. Соответственно, при реализации конечно-элементной модели интегральные жёсткости основания распределяются пропорционально площади, отнесённой к узловым точкам конечно-элементной модели подошвы. Очевидно, что для сплошной среды линейно-деформируемого основания равномерное распределение интегральных статических жесткостей является правомерным только для абсолютно гибкой плиты, то есть при $\Gamma = \infty$.

Для установления реального характера распределения жесткостей грунтов основания по подошве фундаментной конструкции следует исходить из предположения, что распределённые жёсткости прямо пропорциональны величине напряжений, возникающих в грунте на контактной поверхности сооружения с основанием. Следовательно, характер распределения жёсткостей идентичен характеру распреде-

ления напряжений, возникающих в грунте на контактной поверхности сооружения с основанием при их взаимодействии.

Для определения параметров пружин и демпферов, установленных в узловых точках фундаментных конструкций, относящихся к категории жёстких, на основании существующих современных теоретических и экспериментальных данных [3–9] исходили из предположения, что мгновенные составляющие контактных напряжений равномерно распределены по подошве фундаментной плиты, а квазистатические составляющие контактных напряжений распределены по седловидному закону в пролётных зонах, в краевых же зонах подошвы сооружения они стремятся к конечным экстремальным значениям:

– для круглых в плане фундаментных плит

$$\dot{c}_x \left(\dot{c}_y, \dot{c}_z \right) = \frac{\theta_{\Gamma} \cdot A_{x,y} \cdot k_x(k_y, k_z)}{\pi R^2 \sqrt{1 - \frac{(x^2 + y^2)}{(R + \alpha_R)^2}}} \text{ при } 0 \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq R; \quad \dot{c}_x \quad \dot{c}_y \quad \dot{c}_z \quad (1)$$

– для прямоугольных в плане фундаментных плит

$$\dot{c}_x \left(\dot{c}_y, \dot{c}_z \right) = \frac{\theta_{\alpha\Gamma} \left(\frac{L_x}{L_y} \right) \cdot A_{x,y} \cdot k_x(k_y, k_z)}{L_x L_y \sqrt{1 - \left(\frac{2x}{L_x + \alpha_x} \right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{2y}{L_y + \alpha_y} \right)^2}}; \quad (2)$$

$$\bar{c}_x(\bar{c}_y, \bar{c}_z) = \frac{A_{x,y} \cdot c_x(c_y, c_z)}{L_x L_y} \text{ при } 0 \leq |x| \leq 0,5 L_x, \quad 0 \leq |y| \leq 0,5 L_y.$$

Здесь приняты следующие обозначения:

– R – радиус фундаментной конструкции круглой формы в плане;

– L_x, L_y – размеры фундаментной конструкции прямоугольной формы в плане по координатным осям x и y ;

– θ_{Γ} – безразмерный коэффициент, величина которого зависит от гибкости фундаментной плиты круглой формы в плане, значения которого приведены в таблице 1;

– $\theta_{\alpha\Gamma}$ – безразмерный коэффициент, величина которого зависит от отношения размеров сторон в плане $\alpha = \frac{L_x}{L_y}$ гибкости Γ фундаментной плиты прямоугольной формы в плане.

При $\Gamma = 0$; $r \leq 4\alpha$: $\alpha = 1$, $\theta_{\alpha\Gamma} = 0,492$ и $\alpha \geq 10$, $\theta_{\alpha\Gamma} = 0,64$. В интервале $1 < \alpha = \frac{L_x}{L_y} < 10$, значения $\theta_{\alpha\Gamma}$ в зависимости и от гибкости фундаментной плиты и α определяются по таблице 2. В промежуточных значениях Γ и α значение $\theta_{\alpha\Gamma}$ определяется по интерполяции;

– $A_{x,y}$ – площадь подошвы фундаментной конструкции, отнесённая к узловой точке с координатами x и y ;

– $\alpha_R = \frac{\pi R^2}{N}$; $\alpha_x = \frac{L_x}{\sqrt{N}}$; $\alpha_y = \frac{L_y}{\sqrt{N}}$ – среднее значение размера разбивки конечных элементов подошвы фундаментной плиты круглой формы в плане по радиальным направлениям, а

Таблица 1. Значения коэффициента θ_Γ в зависимости от Γ фундаментной плиты круглой формы в плане

Гибкость фундаментной плиты $\Gamma = 30 \cdot \left(\frac{E_0}{E}\right) \cdot \left(\frac{R}{h}\right)^3$	0,000	1,000	5,000	50	≥ 500
θ_Γ	0,500	0,620	0,680	0,954	1,000

Таблица 2. Значения коэффициента $\theta_{\alpha\Gamma}$ в зависимости от Γ и α для фундаментной плиты прямоугольной формы в плане

$\alpha = \frac{L_x}{L_y}$	Гибкость фундаментной плиты $\Gamma = 4,71 \left(\frac{E_0}{E}\right) \left(\frac{L_x}{L_y}\right)^2 \cdot \left(\frac{L_y}{h}\right)^3$				
	0	1	5	50	500
1	0,492	0,550	0,611	0,940	1,00
2	0,510	0,610	0,652	0,945	1,00
3	0,553	0,651	0,693	0,950	1,00
5	0,589	0,680	0,721	0,960	1,00
7	0,625	0,702	0,752	0,965	1,00
10	0,640	0,710	0,770	0,970	1,00

Таблица 3. Эквивалентные квазистатические и мгновенные жёсткости основания при общем характере движения жёсткого штампа круглой формы в плане [2]

Вид движения	Квазистатические жёсткости, моделируемые пружинами	Мгновенные жёсткости, моделируемые демпферами
Горизонтальное поступательное	$k_x = k_y = \frac{31,1GR}{(7-8\mu)}$	$c_x = c_y = \frac{18,24(1-\mu)R^2G}{(7-8\mu)} \sqrt{\frac{\rho}{G}}$
Вертикальное поступательное	$k_z = \frac{4GR}{(1-\mu)}$	$c_z = \frac{3,4R^2G}{\sqrt{1-\mu}} \sqrt{\frac{\rho}{G}}$
Вращательное относительно горизонтальных осей x, y	$k_{\phi x} = k_{\phi y} = \frac{2,13GR^3}{(1-\mu)}$	$c_{\phi x} = c_{\phi y} = \frac{0,525R^4G}{\sqrt{1-\mu}} \sqrt{\frac{\rho}{G}}$
Вращательное относительно вертикальной оси z	$k_{\phi z} = \frac{2,6GR^3}{(1-\mu)}$	$c_{\phi z} = \frac{0,77R^4G}{\sqrt{1-\mu}} \sqrt{\frac{\rho}{G}}$

Таблица 4. Квазистатические и мгновенные жёсткости основания сооружения с фундаментной конструкцией прямоугольной формы в плане [2]

Вид движения	Квазистатическая жёсткость	Мгновенная жёсткость
Горизонтальное поступательное по оси x	$k_x = \frac{31,1(1-\mu)G\sqrt{L_x L_y}}{\sqrt{\pi(7-8\mu)}}$	$c_x = \frac{18,24(1-\mu)GA}{\pi(7-8\mu)} \sqrt{\frac{\rho}{G}}$
Горизонтальное поступательное по оси y	$k_y = \frac{31,1(1-\mu)G\sqrt{L_x L_y}}{\sqrt{\pi(7-8\mu)}}$	$c_y = \frac{18,24(1-\mu)GA}{\pi(7-8\mu)} \sqrt{\frac{\rho}{G}}$
Вертикальное поступательное по оси z	$k_z = \frac{4G\sqrt{L_x L_y}}{\sqrt{\pi(1-\mu)}}$	$c_z = \frac{3,4GA}{\pi\sqrt{1-\mu}} \sqrt{\frac{\rho}{G}}$
Вращательное относительно горизонтальной оси x	$k_{\phi x} = \frac{8,52G}{\sqrt{\pi(1-\mu)}} \left[2 - \left(\frac{L_y}{L_x}\right)^2 \right] \frac{J_{Ax}}{\sqrt{A}}$	$c_{\phi x} = \frac{2,1GJ_{Ax}}{\pi(1-\mu)} \left[1 + 0,32 \left(\frac{L_y}{L_x}\right)^2 \right] \sqrt{\frac{\rho}{G}}$
Вращательное относительно горизонтальной оси y	$k_{\phi y} = \frac{8,52G}{\sqrt{\pi(1-\mu)}} \frac{J_{Ay}}{\sqrt{A}}$	$c_{\phi y} = \frac{2,86GJ_{Ay}}{\pi(1-\mu)} \sqrt{\frac{\rho}{G}}$
Вращательное относительно вертикальной оси z	$k_{\phi z} = \frac{5,2G}{\sqrt{\pi(1-\mu)}} \frac{J_{Az}}{\sqrt{A}}$	$c_{\phi z} = \frac{1,54GJ_{Az}}{\pi(1-\mu)} \sqrt{\frac{\rho}{G}}$

прямоугольной формы в плане – по главным центральным осям инерции x и y ;

N – число конечных элементов на подошве фундаментной плиты;

$\bar{k}_x, \bar{k}_y, \bar{k}_z$ – жёсткости пружин по координатным осям x, y, z , установленных в узловых точках с координатами x, y ;

$\bar{c}_x, \bar{c}_y, \bar{c}_z$ – мгновенные жёсткости демпферов по координатным осям x, y, z , установленных в узловых точках с координатами x, y ;

$k_x, k_y, k_z, c_x, c_y, c_z$ – интегральные квазистатические и мгновенные жёсткости основания, значения которых в зависимости от формы фундаментной плиты в плане определяются выражениями, представленными в таблицах 1.1 и 1.2 [2].

В таблице 1.4 представлены табулированные значения коэффициента θ_Γ в зависимости от гибкости фундаментной плиты круглой формы в плане.

Как обобщение результатов исследований [2] в таблице 2 представлены табулированные численные значения коэффициента $\theta_{\alpha\Gamma}$ в зависимости от гибкости Γ и отношения размеров сторон фундаментной плиты прямоугольной формы в плане α .

В таблицах 1, 2 приняты следующие обозначения:

L_x, L_y – длина и ширина плиты в плане, при этом $L_x \geq L_y$;

E, μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала фундаментной плиты соответственно;

h – толщина фундаментной плиты;

$A = L_x L_y$ – площадь подошвы фундаментной плиты;

E_0, μ_0 – модуль деформации и коэффициента Пуассона грунтов основания.

Фундаментные конструкции представляют собой базовые элементы сооружения. Определение внутренних усилий в сечениях фундаментных конструкций с последующим обоснованием прочности относится к основополагающим требованиям проектирования сооружений, включая сооружения АС.

Выражения для определения эквивалентных квазистатических и мгновенных жёсткостей основания при общем характере движения жёсткого штампа круглой формы в плане, расположенного на поверхности основания в виде линейно-деформируемого полупространства с осреднёнными динамическими характеристиками, скорректированные в [2], представлены в таблице 3.

В таблице 3 приведены следующие обозначения: μ – осреднённое значение коэффициента Пуассона грунтов основания; G – осреднённое значение динамического модуля сдвига грунтов основания; ρ – осреднённое значение плотности грунтов основания; R – радиус подошвы фундамента.

Выражения для определения квазистатических и мгновенных жёсткостей основания сооружения с фундаментной конструкцией прямоугольной формы в плане, расположенной на поверхности основания в виде линейно-деформируемого полупространства с осреднёнными динамическими характеристиками [2], представлены в таблице 4.

В таблице 4 введены следующие дополнительные обозначения:

$L_x, L_y (L_x \geq L_y)$ – размеры (длина и ширина) фундаментной плиты в плане соответственно по координатным осям x и y ; $A = L_x L_y$ – площадь подошвы фундаментной плиты прямоугольной формы в плане; $J_{Ax} = L_x L_y^3 / 12, J_{Ay} = L_y L_x^3 / 12, J_{Az} = J_{Ax} + J_{Ay}$ – моменты инерции подошвы фундаментной плиты относительно главных центральных осей инерции x, y и относительно вертикальной оси z , проходящей через центр тяжести подошвы фундаментной плиты.

Для тестирования выражений для квазистатических и мгновенных жёсткостей основания, представленных в таблицах 3 и 4, полученных в работе [2] (AES), в таблицах 5 и 6 для сопоставления обобщены численные значения жесткостей основания жёсткого штампа, вычисленные по BK CLASSI [10] (CLASSI) и [1] (ASCE) при вариации размеров жёсткого не-весомого штампа $L_x/L_y = 1,0; 2,0; 2,8; 5,0$ и коэффициента

Пуассона грунтов основания $\mu = 0,35$ (таблица 5) и $\mu = 0,44$ (таблица 6).

Расчёты выполнены при следующих исходных данных: $L_x = 51,8$ м – фиксированная длина штампа в плане; $\rho = 2,137$ кН · с²/м⁴ – плотность грунтов; $G = 405,5$ МПа – динамический модуль сдвига грунтов.

Для описания пространственного движения сооружения с учётом конечной жёсткости фундаментных конструкций на контактной поверхности сооружения с основанием в узловые точки конечно-элементной модели по направлениям декартовых систем координат закрепляются по три пары параллельно включённых пружин и демпферов. Горизонтальные оси x и y направлены по главным осям инерции подошвы сооружения, а ось z – вертикально вверх от подошвы. Начало системы координат помещено в центре тяжести подошвы сооружения. Верхние концы всех трёх пар параллельно включённых пружин и демпферов закреплены в узловых точках конечно-

Таблица 5. Результаты тестирования выражений для квазистатических и мгновенных жёсткостей основания при $\mu = 0,35$

L_x/L_y	Теоретическая база	Интегральная жёсткость											
		k_x , Н/м	c_x , Н·с/м	k_y , Н/м	c_y , Н·с/м	k_z , Н/м	c_z , Н·с/м	k_{qz} , Н·м	c_{qz} , Н·м/с	k_{qy} , Н·м	c_{qy} , Н·м/с	k_{qx} , Н·м	c_{qx} , Н·м/с
2,8	CLASSI	3,80E+10	9,23E+08	4,45E+10	1,11E+09	4,92E+10	1,78E+09	4,73E+12	2,54E+10	1,79E+13	2,70E+11	1,67E+13	1,72E+11
	AES	3,44E+10	8,15E+08	3,44E+10	8,15E+08	4,39E+10	1,51E+09	5,15E+12	2,86E+10	2,09E+13	2,84E+11	1,45E+13	1,73E+11
	ASCE	3,24E+10	7,54E+08	3,24E+10	7,54E+08	4,44E+10	1,52E+09	4,71E+12	4,49E+10	2,11E+13	3,33E+11	1,70E+13	-
1,0	CLASSI	5,98E+10	2,57E+09	6,00E+10	2,58E+09	5,51E+10	4,76E+09	3,21E+13	7,56E+11	3,26E+13	7,75E+11	4,59E+13	8,41E+11
	AES	5,70E+10	2,24E+09	5,70E+10	2,24E+09	7,29E+10	4,16E+09	3,47E+13	7,58E+11	3,47E+13	7,82E+11	4,24E+13	8,42E+11
	ASCE	5,41E+10	2,09E+09	5,41E+10	2,09E+09	7,00E+10	3,99E+09	4,20E+13	8,55E+11	4,20E+13	8,55E+11	5,59E+13	-
2,0	CLASSI	4,27E+10	1,25E+09	4,87E+10	1,42E+09	5,17E+10	2,36E+09	8,76E+12	7,33E+10	2,12E+13	3,70E+11	2,15E+13	2,50E+11
	AES	4,03E+10	1,12E+09	4,03E+10	1,12E+09	5,16E+10	2,08E+09	1,07E+13	7,75E+10	2,46E+13	3,91E+11	1,87E+13	2,63E+11
	ASCE	3,80E+10	1,04E+09	3,80E+10	1,04E+09	5,09E+10	2,05E+09	9,28E+12	1,12E+11	2,57E+13	4,39E+11	2,34E+13	-
5,0	CLASSI	3,10E+10	5,64E+08	3,79E+10	7,45E+08	4,34E+10	1,12E+09	1,48E+12	4,05E+09	1,36E+13	1,60E+11	1,17E+13	1,01E+11
	AES	2,55E+10	4,49E+08	2,55E+10	4,49E+08	3,26E+10	8,32E+08	1,22E+12	4,65E+09	1,55E+13	1,56E+11	9,86E+12	8,76E+10
	ASCE	2,48E+10	4,29E+08	2,48E+10	4,29E+08	3,52E+10	8,98E+08	1,37E+12	8,32E+09	1,53E+13	2,08E+11	1,02E+13	-

Таблица 6. Результаты тестирования выражений для квазистатических и мгновенных жёсткостей основания при $\mu = 0,44$

L_x/L_y	Теоретическая база	Интегральная жёсткость											
		k_x , Н/м	c_x , Н·с/м	k_y , Н/м	c_y , Н·с/м	k_z , Н/м	c_z , Н·с/м	k_{qz} , Н·м	c_{qz} , Н·м/с	k_{qy} , Н·м	c_{qy} , Н·м/с	k_{qx} , Н·м	c_{qx} , Н·м/с
2,8	CLASSI	4,07E+10	9,60E+08	4,96E+10	1,22E+09	5,44E+10	2,20E+09	5,54E+12	3,09E+10	2,07E+13	3,22E+11	1,76E+13	1,84E+11
	AES	3,57E+10	8,47E+08	3,57E+10	8,47E+08	5,10E+10	1,75E+09	5,98E+12	3,32E+10	2,43E+13	3,30E+11	1,68E+13	2,01E+11
	ASCE	3,46E+10	8,05E+08	3,46E+10	8,05E+08	5,15E+10	1,77E+09	5,47E+12	5,21E+10	2,44E+13	3,86E+11	1,70E+13	-
1,0	CLASSI	6,58E+10	2,74E+09	6,60E+10	2,74E+09	4,54E+10	5,67E+09	3,57E+13	8,86E+11	3,63E+13	9,09E+11	4,75E+13	8,74E+11
	AES	5,93E+10	2,33E+09	5,93E+10	2,33E+09	8,46E+10	4,83E+09	4,03E+13	8,80E+11	4,03E+13	9,08E+11	4,92E+13	9,78E+11
	ASCE	5,77E+10	2,23E+09	5,77E+10	2,23E+09	8,13E+10	4,63E+09	4,87E+13	9,92E+11	4,87E+13	9,92E+11	5,59E+13	-
2,0	CLASSI	4,59E+10	1,30E+09	5,37E+10	1,53E+09	5,46E+10	2,84E+09	1,01E+13	8,73E+10	2,40E+13	4,34E+11	2,24E+13	2,63E+11
	AES	4,19E+10	1,17E+09	4,19E+10	1,17E+09	5,99E+10	2,41E+09	1,25E+13	9,00E+10	2,85E+13	4,54E+11	2,17E+13	3,06E+11
	ASCE	4,05E+10	1,11E+09	4,05E+10	1,11E+09	5,91E+10	2,38E+09	1,08E+13	1,30E+11	2,98E+13	5,10E+11	2,34E+13	-
5,0	CLASSI	3,28E+10	5,79E+08	4,22E+10	8,22E+08	4,96E+10	1,37E+09	1,71E+12	4,77E+09	1,57E+13	1,89E+11	1,25E+13	1,09E+11
	AES	2,65E+10	4,67E+08	2,65E+10	4,67E+08	3,79E+10	9,65E+08	1,41E+12	5,40E+09	1,8E+13	1,82E+11	1,14E+13	1,02E+11
	ASCE	2,65E+10	4,58E+08	2,65E+10	4,58E+08	4,09E+10	1,04E+09	1,59E+12	9,66E+09	1,77E+13	2,41E+11	1,02E+13	-

элементной модели подошвы сооружения, нижние концы заземлены.

Для установления реального характера распределения жёсткостей грунтов основания по подошве фундаментной конструкции следует исходить из предположения, что распределённые жёсткости прямо пропорциональны величине напряжений, возникающих в грунте на контактной поверхности сооружения с основанием. Следовательно, характер распределения жёсткостей идентичен характеру распределения напряжений, возникающих в грунте на контактной поверхности сооружения с основанием при их взаимодействии.

Как известно, в общем случае характер распределения эпюры контактных напряжений зависит от следующих факторов: геометрической формы фундаментной плиты в плане, гибкости (жёсткости) плиты, скорости и схемы нагружения конструкции.

Для сооружений атомных станций будем исходить из предположения, что фундаментные конструкции относятся к категории жёстких.

Параметры пружин и демпферов, характеризующих жёсткость основания, установленных в узловых точках фундаментных конструкций, были определены на основании обобщения существующих современных теоретических и экспериментальных данных [1–3]. При этом указанные результаты исследований позволяют исходить из предположения, что мгновенные составляющие контактных напряжений равномерно распределены по подошве фундаментной плиты, а квазистатические составляющие контактных напряжений распределены по гиперболическому закону в пролётных зонах, в краевых же зонах подошвы сооружения они стремятся к конечным экстремальным значениям в соответствии с (1), (2).

Необходимое и достаточное условие достоверности принятого закона распределения интегральных жёсткостей основания по подошве для достаточно жёстких фундаментных плит, а также требование к разбивке КЭ модели конструкции

$$\sum_{i=1}^{N1} (\bar{k}_x)_i = k_x; \sum_{i=1}^{N1} (\bar{k}_y)_i = k_y; \sum_{i=1}^{N1} (\bar{k}_z)_i = k_z \quad (3)$$

Угловые жёсткости основания:

$$k_{\phi x} = \sum_{i=1}^{N1} (\bar{k}_z \cdot y^2); k_{\phi y} = \sum_{i=1}^{N1} (\bar{k}_z \cdot x^2); k_{\phi z} = \sum_{i=1}^{N1} (\bar{k}_x \cdot y^2 + \bar{k}_y \cdot x^2) \quad (4)$$

В (3) и (4) приняты следующие обозначения: $i = 1 \dots N1$ – номер узла КЭ модели подошвы фундаментной плиты; x, y – координаты узловой точки с номером i .

Таблица 7. Сопоставление контактных напряжений в отдельных точках на подошве прямоугольного штампа в долях среднего давления от действия вертикальной силы

$2x/L_x$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	0,95
По [8]	0,47500	0,48500	0,51800	0,59200	0,78500	1,07600	1,50400
AES	0,47500	0,48500	0,51800	0,59375	0,79170	1,08970	1,52100

В таблице 7 представлено сопоставление контактных напряжений в отдельных точках на подошве прямоугольного штампа в долях среднего давления от действия вертикальной силы, по принятому в настоящей работе закону распределения и со значениями контактных напряжений, полученными в [2], при $y = 0$.

Результаты, приведённые в таблице 7, подтверждают приемлемость принятого закона распределения квазистатических жёсткостей по подошве фундаментных конструкций на линейно-деформируемом основании.

Продемонстрируем результаты расчётов сооружения реакторного отделения (РО) атомной станции (АС) при воздействии максимального расчётного землетрясения (МРЗ) с применением механической динамической модели основания, расчётные параметры которой определены по [1] и по выражениям, представленным в таблице 4.

Динамические расчёты здания РО проводились с применением метода конечных элементов (МКЭ). Конечно-элементная модель была разработана с использованием ВК ABAQUS. В модели отражена пространственная структура сооружения,

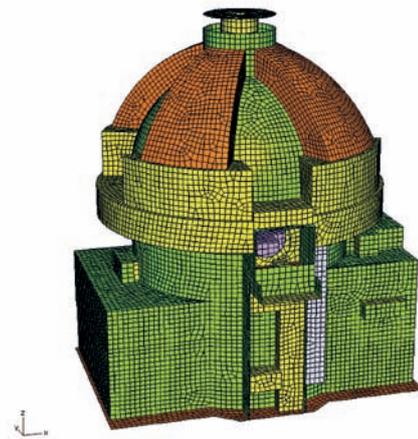


Рис. 1. Здание реакторного отделения. Внешний вид конечно-элементной модели. ВК ABAQUS

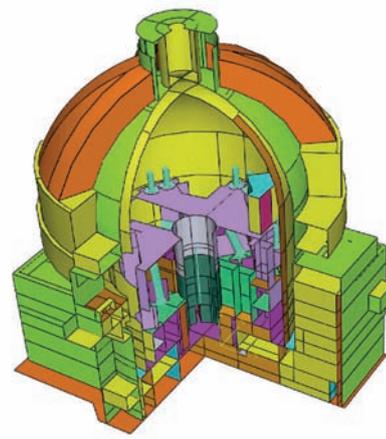


Рис. 2. Здание реакторного отделения. Фрагмент модели с вырезом четверти. ВК ABAQUS

а также выделено отдельное оборудование, инерционные свойства которого способны оказать влияние на характер движения здания при землетрясении. При моделировании системы «основание–сооружение» были использованы облочечные, балочные, твёрдотельные и пружинные элементы. Общее число конечных элементов системы «основание–сооружение» составляет 72 201, число степеней свободы равно 385 350.

Отдельные фрагменты пространственной конечно-элементной модели сооружения представлены на рисунках 1 и 2.

Сооружение реакторного отделения расположено на поверхности упругого инерционного полупространства. Для учёта эффекта взаимодействия сооружения с основанием применена механическая модель основания, расчётные параметры которой вычислены по таблице 1.2 [1] и по таблице 4 [2]. Исходя из цели и постановки задачи, в настоящей работе фундаментная плита сооружения имитирована в виде жёсткого диска с шестью степенями свободы. Механическая модель основания представлена в виде шести параллельно включённых пружин и демпферов, верхние концы которых закреплены в геометрическом центре тяжести фундаментной конструкции сооружения, а нижние концы жёстко заделаны. При этом пружины характеризуют квазистатические, а демпферы – мгновенные жёсткости основания при поступательных и вращательных движениях фундаментной конструкции сооружения.

Размеры сооружения в плане: $L_x = 76,8$ м; $L_y = 51,926$ м – длина и ширина подошвы фундамента сооружения.

Приведённые характеристики основания сооружения: плотность, коэффициент Пуассона, модуль сдвига грунтов $\rho = 2,23$ кН · с²/м⁴; $\mu = 0,39$; $G = 739$ МПа соответственно.

Таблица 8. Расчётные значения параметров динамической модели основания сооружения РО

Расчётные характеристики основания	Значения расчётных параметров динамической модели основания	
	по [1]	по таблице 4 [2]
$k_x, 10^7$ кН/м	13,08	13,64
$k_y, 10^7$ кН/м	13,08	13,64
$k_z, 10^7$ кН/м	17,76	18,29
$k_{\phi_x}, 10^{10}$ кН·м	14,68	15,76
$k_{\phi_y}, 10^{10}$ кН·м	21,38	18,81
$k_{\phi_z}, 10^{10}$ кН·м	22,49	18,33
$c_x, 10^6$ кН·с/м	4,94	5,25
$c_y, 10^6$ кН·с/м	4,94	5,25
$c_z, 10^6$ кН·с/м	9,90	10,20
$c_{\phi_x}, 10^8$ кН·м·с	21,92	21,62
$c_{\phi_y}, 10^8$ кН·м·с	40,12	41,40
$c_{\phi_z}, 10^8$ кН·м·с	22,52	35,61

С применением методик [1; 2] определены интегральные значения жёсткости основания сооружения реакторного отделения атомной станции. Результаты расчётов обобщены в таблице 8.

Литература

1. ASCE STANDARD 4-98. Seismic Analysis of Safety Related Nuclear Structures. American Society of Civil Engineers. Approved September, 1988.

2. Саргсян, А.Е. Разработка и обоснование механической и математической модели основания сооружений атомных станций в виде однородного инерционного полупространства / А.Е. Саргсян, Е.Г. Гукова, А.С. Гришин // Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко «Исследования по теории сооружений». – 2009. – №1. – С. 81–85.

3. Саргсян, А.Е. Динамика и сейсмостойкость сооружений атомных станций / А.Е. Саргсян. – Саров : ОАО Атомэнергопроект, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. – 550 с.

4. Динамика сплошных сред в расчётах гидротехнических сооружений / Б.И. Дидух, В.Л. Лобысев, В.М. Лятхер [и др.]. – М. : Энергия, 1976. – 391 с.

5. Горбунов-Посадов, М.И. Расчёт конструкций на упругом основании / М.И. Горбунов-Посадов, Т.А. Маликова, В.И. Соломин. – М. : Стройиздат, 1984. – 627 с.

6. Жемочкин, Б.Н. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании (без гипотезы Винклера) / Б.Н. Жемочкин, А.П. Сеницын. – М. : Госстройиздат, 1947. – 148 с.

7. Жемочкин, Б.Н. Расчёт круглых плит на упругом основании на симметричную нагрузку / Б.Н. Жемочкин. – М. : ВИА РККА, 1938. – 138 с.

8. Сеймов, В.М. Динамика и сейсмостойкость гидротехнических сооружений / В.М. Сеймов, Б.Н. Островерх, А.И. Ермоленко. – Киев, Наукова думка, 1983. – 318 с.

9. Сеймов В.М. Динамические контактные задачи. – Киев : Наукова думка, 1976. – 283 с.

10. Вычислительный комплекс CLASSI. Определение динамических жесткостей основания жесткого штампа произвольной формы в плане. Разработчик: Калифорнийский университет, Сан-Диего, США

References

1. ASCE STANDARD 4-98. Seismic Analysis of Safety Related Nuclear Structures. American Society of Civil Engineers. Approved September, 1988.

2. Sargsyan A.E., Gukova E.G., Grishin A.S. Razrabotka i obosnovanie mekhanicheskoi i matematicheskoi modeli osnovaniya sooruzhenii atomnykh stantsii v vide odnorodnogo inertsiionnogo poluprostranstva [Generation and proof for dynamic mechanical model of NPP structures foundation in the form of uniform inertial soil half-space]. In *Vestnik TsNIISK im. V.A. Kucherenko V.A. «Issledovaniya po teorii sooruzhenii» [Bulletin V.A. Kucherenko "Studies in the theory of structures"]*, 2009, no.1, pp 81–85. (In Russ.)

3. Sargsyan A.E. Dinamika i seismostoikost' sooruzhenii atomnykh stantsii [ynamics and seismic resistance of nuclear power plant structures]. Sarov, OAO Atomenergoproekt, RFNC-VNIIEF Publ., 2013, 550 p.
4. Didukh B.I., Lobysev V.L., Lyatkher V.M. [et al.]. Dinamika sploshnykh sred v raschetakh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii [Dynamics of continuous media in the calculations of hydraulic structures]. Moscow, Energiya Publ., 1976, 391 p.
5. Gorbunov-Posadov M.I., Malikova T.A., Solomin V.I. Raschet konstruktсии na uprugom osnovanii [Calculation of structures on an elastic foundation]. Moscow, Stroizdat Publ., 1984, 627 p.
6. Zhemochkin B.N., Sinitsyn A.P. Prakticheskie metody rascheta fundamentnykh balok i plit na uprugom osnovanii (bez gipotezy Vinklera) [Practical methods for calculating foundation beams and slabs on an elastic foundation (without Winkler's hypothesis)]. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1947, 148 p.
7. Zhemochkin B.N. Raschet kruglykh plit na uprugom osnovanii na simmetrichnuyu nagruzku [Calculation of round plates on an elastic foundation for a symmetrical load]. Moscow, VIA RKKA Publ., 1938, 138 p.
8. Seimov V.M., Ostroverkh B.N., Ermolenko A.I. Dinamika i seismostoikost' gidrotekhnicheskikh sooruzhenii [Dynamics and seismic resistance of hydraulic structures]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1983, 318 p.
9. Seimov V.M. Dinamicheskie kontaktnye zadachi [Dynamic contact problems]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1976, 283 p.
10. Vychislitel'nyi kompleks CLASSI. Opredelenie dinamicheskikh zhestkosti osnovaniya zhestkogo shtampa proizvol'noi formy v plane [Computing complex CLASSI. Determination of the dynamic stiffness of the base of a rigid die of arbitrary shape in plan Developer: University of California, San Diego, USA]. Developer: University of California, San Diego, USA. San Diego, USA

Саргсян Акоп Егишович (Москва). Доктор технических наук, профессор, академик МАИ при ООН. Начальник Научно-исследовательского отдела динамики и сейсмостойкости АО «Атомэнергопроект» (107996, Москва, Бакунинская ул., д. 7, стр. 1. Атомэнергопроект).

Гукова Елена Геннадиевна (Москва). Главный специалист АО «Атомэнергопроект» (107996, Москва, Бакунинская ул., д. 7, стр. 1. Атомэнергопроект). Эл. почта: gukova_eg@aep.ru.

Sargsyan, Akop E. (Moscow). Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Moscow Aviation Institute at the UN. Head of the Research Department of Dynamics and Seismic Resistance of AO "Atomenergoproekt" (7 Bakuninskaya st, b. 1, Moscow, 107996. Atomenergoproekt).

Gukova, Elena G. (Moscow). Chief Specialist of Atomenergoproekt AO "Atomenergoproekt" (7 Bakuninskaya st, b. 1, Moscow, 107996. Atomenergoproekt). E-mail: gukova_eg@aep.ru.