

*Цурганова Людмила Антоновна, канд. техн. наук, доц.  
УО «Гомельский госуниверситет имени Франциска Скорины»,  
г. Гомель, Беларусь*

***Компьютерное моделирование деформаций грунтового  
основания большеразмерной фундаментной плиты  
с вертикальными сквозными вырезами***

***Compute modelling of deformation of the earth basis large bed  
plate with vertical through cuts***

В статье методом компьютерного моделирования исследуется влияние сквозных вертикальных вырезов на осадку большеразмерной фундаментной плиты на нелинейно-деформируемом грунтовом основании.

In article influence of vertical through cuts at settling large bed plate on non- linearly-deformable earth basis investigated at method of computer modeling.

## 1. ВВЕДЕНИЕ И ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одна из задач в плане ресурсосберегающих технологий в строительстве это поиск экономичных конструкций фундаментных плит. Вариантом решения такой задачи является минимизация материалоемкости большеразмерной фундаментной плиты посредством устройства определенных систем сквозных вертикальных вырезов. Это можно реализовать путем проведения физических экспериментов или методом компьютерного моделирования [1, 4]. Однако подготовка и реализация физических экспериментов являются трудоемкими и требует значительных затрат времени и материалов. Более эффективным является компьютерное моделирование деформаций грунтового основания фундаментных плит, которое позволяет быстро исследовать значительное количество вариантов фундаментных плит с системой вертикальных сквозных вырезов и выбрать оптимальный из них.

В настоящей работе рассматривается большеразмерная фундаментная плита на грунтовом основании. Плита может содержать внутри сквозные вертикальные вырезы. Количество вырезов и их местоположение зависит от размеров плиты и физико-механических свойств грунтового основания. На плиту действует вертикальная равномерно распределенная нагрузка. Необходимо исследовать влияние различных систем вертикальных сквозных вырезов на деформацию грунтового основания при его линейном и нелинейном деформировании и определить систему вырезов, которая изменяет осадку плиты в допустимых пределах.

В формализованной постановке рассматриваемая задача является третьей краевой задачей математической физики. Она не имеет строго аналитического решения. Ее решение возможно с помощью компьютерного моделирования, методика которого основана на методах математического и геометрического моделирования, визуального объектно-ориентированного программирования, вариантного проектирования и методах вычислительного эксперимента [2].

## 2. ОСНОВЫ МЕТОДИКИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ БОЛЬШЕРАЗМЕРНОЙ ПЛИТЫ С ВЫРЕЗАМИ

Компьютерное моделирование основано на принципах системного подхода, т.е. большеразмерная плита с приложенной к ней нагрузкой и грунтовое основание рассматриваются как единая пространственная нелинейная физическая система. Такая система может быть любых размеров и ее элементы могут иметь различные физико-механические характеристики.

Математическая модель физической системы «большеразмерная плита – грунтовое основание» включает в себя геометрическую, структурную, механико-математическую модели, краевые условия и условия равновесия системы.

Геометрическую модель для задач такого класса целесообразно задавать в виде прямоугольного параллелепипеда, размеры которого включают область существования физической системы.

Структурная модель исследуемой системы определяется структурой грунтового основания и элементами большеразмерной фун-

даментной плиты. Элементы системы могут иметь различные физико-механические характеристики.

Краевые условия на боковых и нижних гранях области существования системы «большеразмерная плита – грунтовое основание» задаются на основании экспериментальных исследований или исходя из принципа Сен-Венана и решения Буссинеска задачи о сосредоточенной силе на поверхности полупространства. На верхней грани, на поверхности плиты, задается внешняя нагрузка.

Механико-математическая модель системы «большеразмерная плита – грунтовое основание» определяет нелинейную деформируемость грунтового основания и его неоднородность:

для основания

$$\sigma_i = \begin{cases} E_{,cp} \varepsilon_i^e, & \text{если } \sigma < \sigma_{i,сп}^e, \quad E_{,cp} > 0, \\ A \varepsilon_i^m, & \text{если } \sigma_i \geq \sigma_{i,сп}^e, \quad A > 0, \quad 0 < m < 1, \end{cases}$$

для плиты

$$\sigma_i = E_{,пл} \varepsilon_i^e, \quad E_{,пл} \gg E_{,cp},$$

где  $A, m$  – параметры закона деформирования;

$E_{,пл}$  – модуль упругости фундаментной плиты;

$E_{,cp}$  – модуль упругости грунтового основания;

$\sigma_i, \varepsilon_i$  – интенсивности напряжений и деформаций;

$e$  – упругое деформирование;

$\sigma_{i,сп}^e$  – критическое значение интенсивности напряжений при упругом деформировании.

Условия равновесия системы основываются на принципе минимума полной энергии:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{U\}} = 0;$$

где

$$П = 0,5 \int_V \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV - \{U\}^T \{P\},$$

$\{P\}, \{\sigma\}, \{U\}, \{\varepsilon\}$  – векторы внешних сил, напряжений, перемещений и деформаций;

$П$  – полная энергия деформируемой системы.

Исследование математической модели системы «большеразмерная плита – грунтовое основание» производится посредством построения пространственной конечно-элементной модели с учетом стационарности характеристик, определяющих свойства элементов основания, плиты и места приложения нагрузки. Разбивка на пространственные элементы производится так, что в пределах одного элемента участок среды рассматривается как однородный. Любой другой элемент, оставаясь однородным, может характеризоваться свойствами, отличными от соседних элементов. Таким образом, система «большеразмерная плита – грунтовое основание» в целом представляет неоднородную среду [2, 3].

Применение метода конечных элементов к исследованию системы «большеразмерная плита – грунтовое основание» приводит к построению и решению системы линейных алгебраических уравнений:

$$[K] \{U\} = \{F\},$$

где  $[K]$  – матрица жесткости системы,

$\{U\}$  – вектор узловых перемещений;

$\{F\}$  – вектор узловых усилий.

Решение этой системы определяет перемещения в узлах конечных элементов. На основании этого решения определяются деформации и напряжения для каждого конечного элемента.

Для определения нелинейных деформаций используется метод энергетической линеаризации [2], который позволяет на основе линейного решения и выбранного закона деформирования получить нелинейное решение. Решение нелинейной задачи методом энергетической линеаризации производится за два этапа. На первом этапе определяется линейное решение задачи, а на втором, на основании предыдущего решения и принятого закона деформирования, вычис-

ляются секущие модули упругости и коэффициент Пуассона для каждого конечного элемента. Для полученных значений модуля упругости и коэффициента Пуассона при поставленных граничных условиях решается еще раз линейная задача, но уже для неоднородной области. Решение этой задачи, согласно принятым условиям, будет являться и решением исходной нелинейной задачи.

Компьютерное моделирование системы «большеразмерная плита – грунтовое основание» реализуется с помощью программного комплекса «Энергия - 3Д-08», который предназначен для численного исследования взаимодействия различных фундаментов и нелинейно-деформируемого грунтового основания.

Компьютерное моделирование предполагает предварительную подготовку расчетной области, ее размеров, нерегулярную дискретизацию и структуру расчетной области, место приложения нагрузки.

Исходными данными программного комплекса «Энергия - 3Д-08» являются количество точек  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  нерегулярной решетки по осям  $Ox$ ,  $Oy$  и  $Oz$ , векторы шагов  $h_x$ ,  $h_y$ ,  $h_z$ , физико-механические характеристики грунта, плиты, нагрузка в виде вектора по точкам ее приложения, задание или выбор граничных условий. Исходные данные вводятся с клавиатуры, или из файла или формируются на экране монитора.

Результаты выдаются на экран в виде таблиц и записываются в файл.

### 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ БОЛЬШЕРАЗМЕРНОЙ ПЛИТЫ С ВЕРТИКАЛЬНЫМИ СКВОЗНЫМИ ВЫРЕЗАМИ

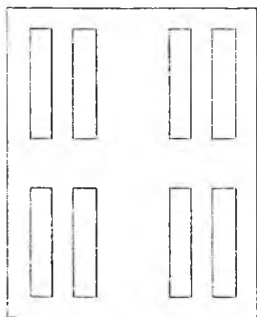
Компьютерное моделирование деформаций грунтового основания большеразмерной фундаментной плиты с вертикальными сквозными вырезами проводилось для пространственной физической системы, имеющей следующие характеристики:

1. Большеразмерная фундаментная плита с размерами  $800 \times 1200 \times 80$  см, которая может содержать определенные системы внутренних вертикальных сквозных вырезов. Модуль упругости для фундаментной плиты  $E = 40000$  МПа ( $400000$  кг/см<sup>2</sup>); коэффициент Пуассона для фундаментной плиты  $\mu = 0,01$ .

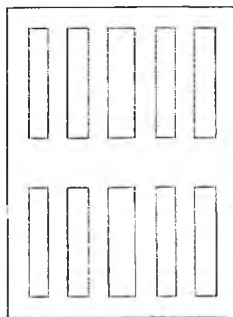
2. Однородное грунтовое основание, имеющее следующие физико-механические характеристики: модуль упругости  $E = 36 \text{ МПа}$  ( $360 \text{ кг/см}^2$ ); коэффициент Пуассона  $\mu = 0,25$ .

3. Нагрузка, приложенная на плите –  $12000 \text{ кН}$  ( $1200000 \text{ кгс}$ ).

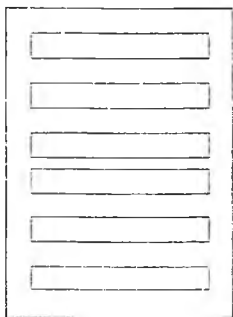
Деформации грунтового основания определялись для сплошной плиты и для плит, имеющих определенные системы сквозных вертикальных внутренних вырезов, что показано на рис. 1.



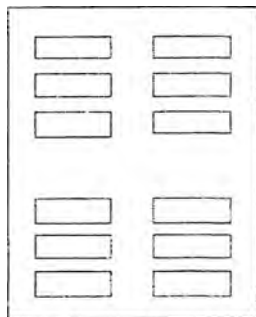
а)



б)



в)



д)

Рис. 1. Схемы вертикальных сквозных вырезов

В силу симметрии численное решение проводилось для одной четверти деформируемой области. Размеры расчетной области  $850 \times 1055 \times 50 \text{ см}$ . Шаги нерегулярной решетки:

$H_x = \{66,66,66,66,66,70,70,80,90,100,110\}$ ;

$H_y = \{75,75,75,75,75,75,75,75,75,80,90,100,110\}$ ;

$H_z = \{80,80,100,120,160,180\}$ .

В табл. 1 приведены осадки плиты для линейно- и нелинейно-деформируемого грунтового основания, площадь контактной поверхности плиты, уменьшение площади контактной поверхности и увеличение осадки.

Таблица 1

Результаты решения модельных задач

Тип плиты	Площадь контактной поверхности, м <sup>2</sup>	Осадка плиты, см		Уменьшение площади контактной поверхности, %	Увеличение осадки плиты, %	
		лин.	нелин.		лин.	нелин.
Сплошная плита	96	2,72	5,23	—	—	—
Плита с вырезами, схема <i>a</i>	72,24	2,77	5,30	24,75	1,8	1,3
Плита с вырезами, схема <i>b</i>	60,36	2,80	5,36	37,125	3,15	2,42
Плита с вырезами, схема <i>в</i>	60,36	2,82	5,40	37,125	3,84	3,11
Плита с вырезами, схема <i>г</i>	56,4	2,83	5,37	41,25	4,6	3,4

Анализ результатов, приведенных в табл. 1, показывает, что существуют определенные системы вырезов, которые уменьшают контактную поверхность плиты до 40 %, и увеличивают незначительно осадку большеразмерной фундаментной плиты до 5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безухов, Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. – М: Высшая школа, 1968. – 512 с.

2. Быховцев, В.Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твёрдых тел / В.Е. Быховцев. – Гомель: УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2007. – 219 с.

3. Цурганова, Л.А. Управление осадкой большеразмерной фундаментной плиты на сложном нелинейно-деформируемом грунтовом основании / Л.А. Цурганова // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2006. – № 4. – С. 100–102.

4. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М: Стройиздат, 1963. – 542 с.