

УДК 531:004.925

## КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПУСТОТ В ГРУНТОВОМ ОСНОВАНИИ НА ОСАДКУ ФУНДАМЕНТА

В.Е. Быховцев, С.В. Торгонская

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель

## COMPUTER ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF EMPTINESS IN THE EARTH BASIS ON THE DEPOSIT OF THE BASE

V.E. Bykhautsau, S.V. Torgonskaya

F. Scorina Gomel State University, Gomel

Исследуется влияние структурных особенностей грунтового основания на осадку фундамента.

**Ключевые слова:** грунтовое основание, деформации, осадка фундаментов, компьютерное объектно-ориентированное моделирование.

Influence of structural features of the soil basis on the base deposit is investigated.

**Keywords:** soil bases, deformations, deposit of the bases, computer objective – focused modeling.

### Введение

Грунтовые основания фундаментов строительных объектов всегда характеризуются неоднородностью своей структуры. В составе структуры оснований могут содержаться слои, линзы, включения пониженной несущей способности и пустоты, расположенные на различной глубине от поверхности.

Фундаменты объединяют здание и грунтовое основание в единую физическую систему «Здание – фундаменты – грунтовое основание», в которой составляющие ее элементы следует рассматривать как физические подсистемы, состоящие из отдельных элементов твердых тел, обладающих определенными геометрическими и физико-механическими характеристиками. Взаимодействие зданий, фундаментов любых типов и грунтовых оснований всегда сопровождается их деформацией, величина которой определяется их физико-механическими свойствами и установившимися связями, поэтому состояние всей системы «Здание – фундаменты – грунтовое основание» необходимо исследовать с позиций системного подхода и основных положений нелинейной механики деформируемого твердого тела.

Учет указанных особенностей позволит наиболее полно оценить несущую способность грунтового основания под действием нагрузки от сооружений, а также принять наиболее безопасные и экономичные решения при возведении зданий.

**Физическая постановка задачи.** В настоящей работе исследуется напряженно-деформированное состояние сложной нелинейной системы «Фундамент – грунтовое основание». Внешняя нагрузка приложена к верхней поверхности

фундамента. В качестве базовой задачи рассматривается плитный фундамент, заглубленный в однородное грунтовое основание и имеющий внешние геометрические и физико-механические характеристики, аналогичные исследуемому типу фундамента (рисунок 2.1). На ее основе исследуется влияние пустот в грунтовом основании на осадку фундамента и на несущую способность грунтового основания при условии его линейного и нелинейного деформирования.

Данная задача является краевой задачей нелинейной математической физики [1]. Решение было получено методом объектно-ориентированного компьютерного моделирования на основе системного подхода, метода конечных элементов, рассмотренного совместно с методом энергетической линеаризации [2], [3]. Исследование деформационного процесса указанной системы проводилось с помощью программного комплекса «Энергия – 2D» [2].

### 1 Методика и технология компьютерного объектно-ориентированного моделирования осадки фундамента на грунтовом основании

**Математическая модель системы.** При компьютерном объектно-ориентированном моделировании реальной физической системе ставится в соответствие её виртуальная физическая модель, которая строится на экране монитора и отображает структуру исходной системы [2]. Это сразу накладывает свои требования на структуру и содержание математической модели. Для рассматриваемого класса задач математическая модель будет иметь следующую структуру:

1. Геометрическая модель геологического разреза основания.

2. Механико-математическая модель элементов структуры грунтового основания принята в виде степенной функции

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^m, \quad A > 0, \quad 0 < m < 1. \quad (1.1)$$

3. Система граничных условий задаётся в соответствии с классификацией поставленной задачи как краевой задачи математической физики. На части границы области определения исследуемой системы задаётся система внешних сил, обусловленных нагрузкой от здания или сооружения.

4. Условия равновесия системы (ядро математической модели):

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

где  $\Pi = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV - \{U\}^T \{P\}$  – полная энергия деформируемой системы,  $\{P\}$  – вектор внешних сил,  $\{\sigma\}$ ,  $\{\varepsilon\}$ ,  $\{U\}$  – векторы напряжений, деформаций и перемещений,  $V$  – объём области существования исследуемой системы.

Вследствие применения процедур метода конечных элементов ядро математической модели преобразовывается к виду  $[K]\{U\} = \{P\}$ , где  $[K]$  – матрица жесткости системы.

5. Математическая модель (форма) искомого решения  $\varphi = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 z$ .

Данная структурная схема является общим эффективным алгоритмом построения математических моделей систем или объектов.

Исследование математической модели проводилось методом вариантного проектирования. Для этого было построено несколько вариантов задачи, учитывающих структуру и свойства грунтового основания.

*Технология компьютерного объектно-ориентированного моделирования системы деформируемых твёрдых тел.* Технология визуального объектно-ориентированного моделирования сложной нелинейной системы «Фундамент – грунтовое основание» основывается на методологии процесса моделирования, содержании и назначении моделируемых задач и представлена следующим образом [2]–[5]:

- определение формы и начальных размеров расчётной области;
- построение геометрической модели грунтового основания строительной площадки, определение мощности и глубины залегания слоёв с указанием их физико-механических характеристик;
- определение типа и структуры фундамента. В качестве фундамента принят плитный фундамент;
- физико-механические характеристики элементов структуры основания и фундамента. Закон деформирования принят в виде степенной функции (1.1);

– определение величины и характера распределения внешней нагрузки;

– определение параметров дискретизации. Дискретизация расчетной области проводилась конечными элементами в виде прямоугольных треугольников. Всякий элемент дискретизации, т. е. всякий конечный элемент, по своей структуре и свойствам является строго однородным.

## 2 Компьютерное моделирование осадки фундамента на нелинейно – деформируемом грунтовом основании

*Модельная задача № 1 (Фундамент плитный – однородное грунтовое основание)*

Фундамент плитный, заглублен в грунтовое основание на 30 см. Модуль упругости для фундамента  $E = 40000$  МПа (400000 кг/см<sup>2</sup>), для грунта  $E = 36$  МПа (360 кг/см<sup>2</sup>); коэффициент Пуассона для фундамента  $\mu = 0,01$ , для грунта  $\mu = 0,2$ . Нагрузка  $P = 24$  кН (2400 кгс) приложена к поверхности фундамента.

Дискретизация проводилась прямоугольными треугольниками. Схема дискретизации расчетной области представлена на рисунке 2.1. Темно-серым цветом обозначена плита, светло-серый фон соответствует грунту.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65
66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78
79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91
92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104
105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117

Рисунок 2.1 – Схема дискретизации расчётной области

На рисунке 2.2 представлено содержание и способы вводимых данных и дискретная модель исходной системы.

*Модельная задача № 2 (Плитный фундамент – грунтовое основание с пустотным образованием)*

Исходные физико-механические характеристики фундамента остаются прежними, в качестве грунтового основания рассматривается грунтовое основание, содержащее пустотную подобласть. Рассматриваемая физическая система определена в двусвязной области. Решение задачи было получено путем замены исходной двусвязной области неоднородной сплошной областью, эквивалентной по несущей способности исходной системе деформируемых твёрдых тел и геометрически ей равной.

На рисунке 2.3 представлено содержание и способы вводимых данных и дискретная модель исходной системы.

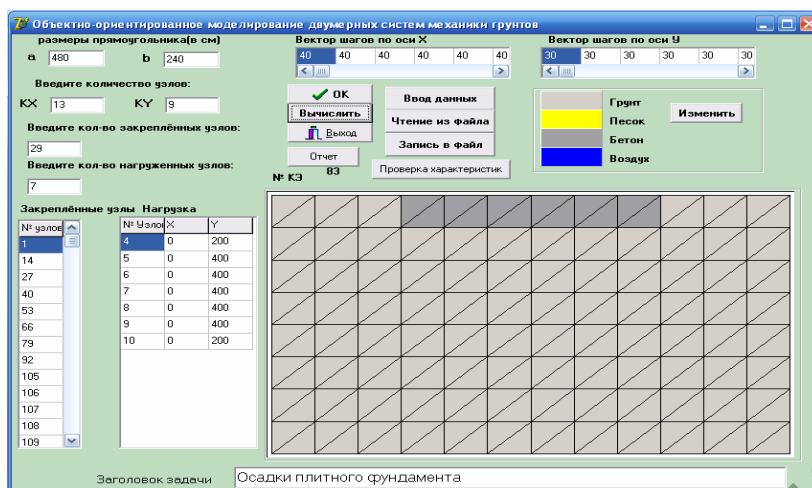


Рисунок 2.2 – Главное окно приложения дискретной физической системы и ввода исходных данных

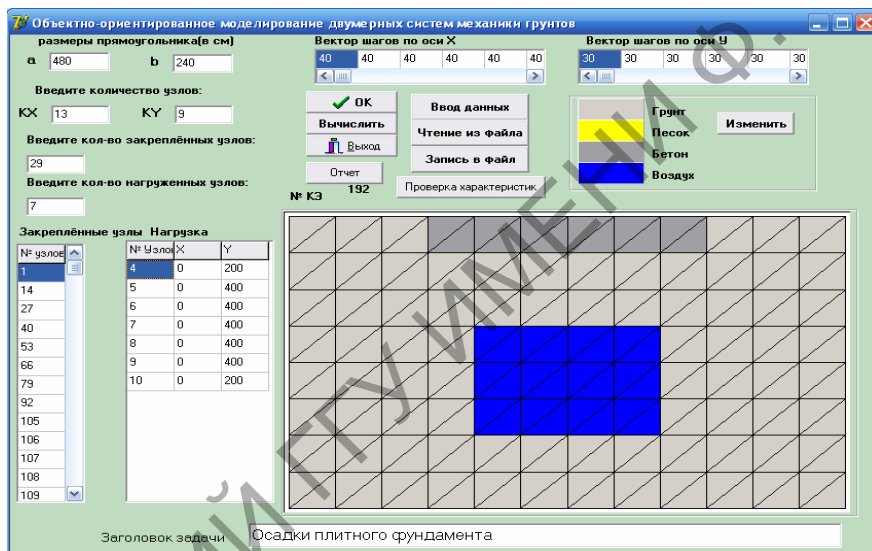


Рисунок 2.3 – Главное окно приложения дискретной физической системы

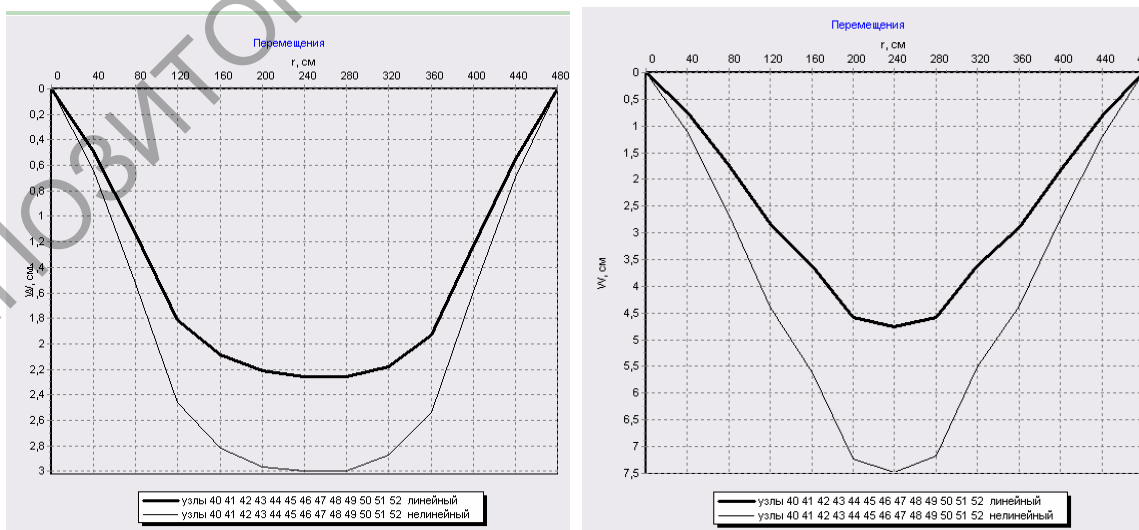


Рисунок 2.4 – Графики линейного и нелинейного перемещения плитного фундамента на однородном и неоднородном грунтовом основании

Таблица 2.1 – Значения горизонтальных и вертикальных составляющих перемещений в узлах деформируемой области плитного фундамента (см)

№№ узлов	Однородное основание				Неоднородное основание			
	Линейное решение		Нелинейное решение		Линейное решение		Нелинейное решение	
	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$
3	-0,863	1,423	-1,115	1,962	-1,187	2,199	-1,780	3,438
4	-1,699	3,151	-2,308	4,471	-2,391	4,793	-3,748	7,689
5	-2,062	3,093	-2,816	4,351	-2,939	4,679	-4,616	7,449
6	-2,012	3,168	-2,736	4,422	-2,856	4,766	-4,469	7,534
7	-2,033	3,231	-2,756	4,480	-2,880	4,832	-4,493	7,597
8	-2,077	3,286	-2,810	4,529	-2,939	4,880	-4,574	7,643
9	-2,194	3,333	-2,963	4,572	-3,102	4,916	-4,822	7,678
10	-2,534	3,326	-3,423	4,543	-3,593	4,872	-5,584	7,595
11	-1,860	1,925	-2,521	2,562	-2,640	2,820	-4,125	4,308
16	-0,928	1,480	-1,245	2,029	-1,268	2,279	-1,975	3,548
17	-1,195	2,991	-1,573	4,247	-1,611	4,552	-2,465	7,306
18	-1,194	3,068	-1,571	4,318	-1,608	4,643	-2,463	7,392
19	-1,191	3,139	-1,569	4,382	-1,603	4,723	-2,458	7,467
20	-1,187	3,200	-1,565	4,437	-1,596	4,785	-2,451	7,524
21	-1,183	3,250	-1,561	4,480	-1,590	4,828	-2,444	7,562
22	-1,180	3,290	-1,558	4,514	-1,585	4,854	-2,440	7,582
23	-1,178	3,325	-1,557	4,542	-1,582	4,870	-2,437	7,593
24	-0,897	1,755	-1,158	2,319	-1,225	2,582	-1,838	3,917
43	-0,997	1,816	-1,306	2,457	-1,216	2,832	-1,859	4,383
44	-1,019	2,089	-1,337	2,818	-1,087	3,612	-1,680	5,601
45	-0,991	2,209	-1,283	2,968	-0,779	4,586	-1,163	7,230
46	-0,922	2,260	-1,202	3,000	-0,644	4,755	-0,943	7,482
47	-0,807	2,260	-1,045	2,993	-0,556	4,589	-0,807	7,167
48	-0,619	2,181	-0,791	2,872	-0,566	3,620	-0,832	5,519
49	-0,337	1,931	-0,420	2,534	-0,353	2,896	-0,501	4,369
56	-0,738	1,405	-0,941	1,851	-1,016	2,141	-1,501	3,258
57	-0,728	1,646	-0,934	2,168	-0,852	2,539	-1,261	3,892
58	-0,673	1,756	-0,852	2,295	-0,913	3,107	-0,800	3,588
59	-0,588	1,794	-0,749	2,324	-0,700	3,181	-0,591	3,535
60	-0,467	1,775	-0,595	2,303	-0,390	3,034	-0,264	3,844
61	-0,302	1,679	-0,381	2,164	-0,231	2,505	-0,328	3,751
62	-0,099	1,449	-0,115	1,868	-0,027	2,147	-0,016	3,187

Для сравнительного анализа в таблице 2.1 представлены значения горизонтальных и вертикальных составляющих перемещений в узлах деформируемой области плитного фундамента на однородном и с пустотной подобластью грунтового основании.

На рисунке 2.4 представлены графики линейного и нелинейного перемещения плитного фундамента на однородном и неоднородном грунтовом основании соответственно.

### 3 Анализ результатов и выводы

При заданных условиях осадка плиты на грунтовом основании, состоящем из минерального грунта, составила в среднем 3,2 см при линейном деформировании и 4,5 см при нелинейном деформировании. На грунтовом основании, содержащем пустотную подобласть, осадка плиты возросла до 4,8 см и 7,6 см при линейном и

нелинейном деформировании соответственно. Следовательно, для данной конкретной задачи наличие пустотной области в грунтовом основании увеличивает осадку фундамента на 50% при линейном деформировании и на 69% при нелинейном деформировании.

Как видно из таблицы 2.1, несущая способность грунтового основания с пустотной подобластью резко падает, максимальные перемещения грунта наблюдаются в контактной области грунтового основания и плитного фундамента и в срединной части расчетной области, а значит, возможен провал грунтового основания непосредственно в пустотную область.

Следует отметить, что нагрузка, приложенная к верхней части плитного фундамента, через пустотную область не передается, т. е. данная воздушная линза принимает ее на себя. Это подтверждается тем, что перемещения узлов № 96–

100 малы. Иными словами, пустотная область играет роль своеобразной воздушной пробки.

При исследовании деформаций грунтового основания с пустотной областью, расположенной под центром фундаментной плиты, в узлах № 3, 16, 11, 24, был выявлен телескопический сдвиг грунта. Это значит, что воздушная подобласть является воздушной линзой, которая препятствует передаче нагрузки на слои грунта, расположенных под этой линзой.

Поэтому в случае, когда воздушная полость в грунтовом основании обнаружена, необходимо либо ликвидировать эту полость, либо использовать иной тип фундамента.

#### **Заключение**

Количественная оценка и анализ напряженно-деформированного состояния сложной структуры грунтового основания с использованием программного комплекса «Энергия – 2D» позволяют оценить несущую способность грунтового основания и определить конструкцию фундамента, рациональную для реального грунтового основания.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. *Партон, В.З.* Методы математической теории упругости / В.З. Партон, П.И. Перлин. – М. : Наука, 1981. – 688 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. *Зенкевич, О.* Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 540 с.
4. *Журавков, М.А.* Математическое моделирование деформационных процессов в твёрдых деформируемых средах / М.А. Журавков. – Мн. : БГУ, 2002. – 456 с.
5. *Цытович, Н.А.* Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М. : Стройиздат, 1963. – 542 с.

*Поступила в редакцию 25.10.11.*