

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕЦЕНТРЕННО НАГРУЖЕННЫХ ФУНДАМЕНТОВ НА СЛОИСТЫХ ОСНОВАНИЯХ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

У статті розглянуті питання математичного моделювання поведінки позацентрово навантажених фундаментів на шаруватих основах. Показано, що застосування методу скінченних елементів для розрахунку таких фундаментів дозволяє отримати результати, які найбільш адекватні реальним умовам.

В статье рассмотрены вопросы математического моделирования поведения внецентренно нагруженных фундаментов на слоистых основаниях. Показано, что применение метода конечных элементов для расчетов таких фундаментов позволяют получить результаты наиболее адекватные реальным условиям.

The article considers the issues of mathematical modelling of behaviour the outside-of-the-centre loaded basements, resting on multi-layer beds. It has been shown that application of the finite elements method for calculation of such basements allows to get the results, most adequate to real conditions.

В последнее время, в связи с увеличением объемов транспортного строительства, стали актуальными вопросы нормальной эксплуатации зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях. Известно, что условия строительства в Украине являются неблагоприятными, так как грунты оснований представлены слабыми, слоистыми, структурно неустойчивыми и просадочными формациями [1]. Прежде всего это вызывает значительные осадки и крены эксплуатируемых транспортных сооружений [2]. Поэтому актуальной проблемой является прогнозирование указанных явлений, причем ее решение дает возможность улучшить условия эксплуатации строительных объектов в случае сложных инженерно-геологических условий.

Экспериментальное определение мощности деформируемой толщи структурно неустойчивых и слоистых оснований в натуральных условиях затруднено из-за отсутствия способов определения исходного природного напряженного состояния от действия собственного веса и нарушения целостности массива при внедрении измерительных приборов.

По данным наблюдений за послойными деформациями оснований, сложенных сильно сжимаемыми грунтами, в случае как центрально, так и внецентренно приложенной нагрузки, их измеренная величина более чем в 2 раза превышала ширину фундамента [2].

Прогнозирование осадок и кренов фундаментов транспортных сооружений возможно еще на

стадии их проектирования. Причем его эффективность зависит от следующих факторов:

1) адекватное исследование свойств грунтовых оснований;

2) создание модели системы «сооружение – основание», которая наиболее полно отражает реальную ситуацию;

3) анализ полученных результатов с разработкой решений, ведущих к улучшению дальнейшей эксплуатации.

Учет первого фактора при прогнозировании осадок и кренов фундаментов на слоистых или структурно неустойчивых основаниях возможен при наличии современной методики исследования деформационных характеристик грунтов. Причем такие методики уже существуют и достаточно апробированы [3–5]. Менее же всего разработаны проблемы учета второго и третьего факторов. Для анализа осадок с прогнозом поведения системы «сооружение – основание» возможно использование либо лабораторных испытаний, либо математического моделирования.

Применение математического моделирования наиболее целесообразно, так как не требует значительных затрат, а современные расчетные комплексы позволяют проводить его на высоком техническом уровне [6; 7].

Математическое моделирование поведения системы, в которой взаимодействие конструкции и основания, устанавливается с помощью метода конечных элементов (МКЭ) – эффективное средство теоретического анализа задач.

МКЭ с развитием расчетов с использованием ПЭВМ постепенно занял первое место среди численных методов расчета НДС оснований, что обусловлено развитием профессиональных расчетных комплексов, таких как ANSYS, Lira, NASTRAN, SCAD. Простота метода, основанная на действиях с матрицами, постепенная модернизация его теоретических основ (обоснование метода с позиций вариационных методов), удобство и почти универсальность являются главными преимуществами применения метода для расчета различных типов сооружений. Уровень развития МКЭ на сегодняшний день дает возможность расчета сложных сооружений с разнообразными сочетаниями нагрузок различных видов действия, в том числе динамических; сред со сложной неоднородной структурой; конструкций с любой степенью структурной сложности их элементов и т. д. Расчет на ЭВМ является наиболее эффективным способом решения сложных систем линейных и нелинейных уравнений, описывающих многие процессы взаимодействия фундамента и основания, что позволяет резко сократить сроки на разработку новых типов конструкций повышенной эффективности и оценить малоисследованные процессы с получением стойкого экономического эффекта.

При использовании метода конечных элементов, сплошная среда аппроксимируется в процессе решения некоторой дискретной моделью. На этой основе выдвигается логическая альтернатива классическому подходу – с самого начала представлять сплошную среду при помощи дискретной модели [8–10].

При классическом подходе механики сплошной среды обычно начинают с изучения свойств бесконечно малых элементов. При использовании метода конечных элементов начинают с изучения свойств элементов конечных размеров. При установлении этих свойств могут использоваться уравнения, описывающие поведение конечного континуума.

Важным моментом, который следует отметить при анализе возможностей МКЭ, является наличие достаточно разработанного процесса математического описания дискретных элементов модели, которые называются конечными, а именно, аналитического определения формы элемента с помощью координатных функций. Этот процесс дает возможность довольно простого отображения сложных объектов в виде дискретных моделей, причем применяющиеся

координатные функции достаточно полно исследованы, что указывает на наличие серьезной основы данного метода.

В МКЭ сплошная среда с бесконечным числом степеней свободы представляется дискретной моделью, имеющей конечное число степеней свободы [9; 10]. С увеличением числа конечных элементов и уменьшением их размеров поведение дискретной системы приближается к поведению «непрерывной системы» – сплошной среды. Новые исследования в области применения численных методов, в том числе и МКЭ, подтверждает их большие возможности при решении сложных задач. Завершенные в 90-х годах прошлого века исследования по обоснованию МКЭ с позиций вариационного метода [10] доказали адекватность метода физическим основам поведения явлений, которые им исследуются.

При анализе МКЭ фундаментов транспортных сооружений следует уделять особое внимание взаимодействию на границе раздела фундамента и основания, строению массива и его свойствам и комплексу нагрузок на фундамент. Известно, что фундамент при внецентренно приложенной нагрузке начинает крениться, причем крен совместно с осадкой по высоте составляет сложную картину перемещений фундамента. Внецентренно приложенная нагрузка присуща большому количеству объектов: трубы с ветровой нагрузкой, промышленные здания с фундаментами на неоднородных и слоистых основаниях, здания и сооружения сложной формы, башни и т. д.

В данной работе проведен численный анализ фундамента, который нагружен внецентренно приложенной нагрузкой. Следует отметить, что с применением расчетного комплекса SCAD for Windows уточняется модель системы «фундамент–основание» [11]. Анализируя работу фундамента с внецентренно приложенной силой, можно сделать вывод о том, что при действии силы с достаточным эксцентриситетом возможен отрыв фундамента от основания. При моделировании МКЭ такой системы реализовать данное условие довольно сложно, так как пластины фундамента или жесткого штампа по условиям модели жестко прикреплены к пластине моделируемого основания, причем последнее имеет достаточную деформативность, что вызывает крен фундамента. Поэтому в схеме предусмотрен ряд конечных элементов с уменьшенной жесткостью, находящийся под

пластиной, моделирующей штамп, который позволяет моделировать взаимодействие элементов штампа и массива с возможностью крена в случае внецентренной нагрузки.

В нашем случае была сделана разбивка модели грунта и штампа на прямоугольные конечные элементы (рис. 1).

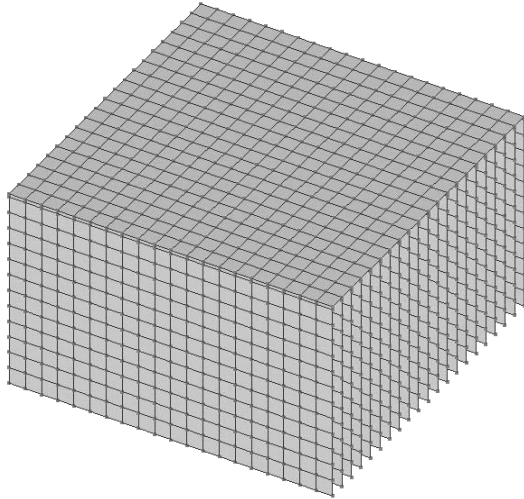


Рис. 1. Общая схема модели грунта с разбивкой на конечные элементы

Так как основание являлось трехслойным, для адекватности отражения его свойств жесткостные характеристики принимались соответственно для каждого слоя. Метод переменного модуля деформации позволяет учесть неоднородность напластования отдельных слоев в плане и распределительную способность грунта за пределами подошвы фундамента, который нагружен внецентренно приложенной силой. Нижний и верхний слои: суглинок, модуль деформации  $E_0 = 570$  кПа; удельное сцепление  $c = 18$  кПа; угол внутреннего трения  $\varphi = 17^\circ$ . Средний слой: песок мелкий, модуль деформации  $E_0 = 2350$  кПа; удельное сцепление  $c = 2$  кПа; угол внутреннего трения  $\varphi = 32^\circ$ . Материал штампа – сталь обыкновенная с  $E = 2,1 \cdot 10^6$  МПа,  $\mu = 0,3$ . Количество узлов в модели – 6147, конечных элементов – 5860.

Заключительный этап использования данного метода – расчет крена МКЭ при данном давлении на штамп. На рис. 2 приведена схема экспериментальной установки для определения осадок и кренов в случае слоистого основания. Толщина каждого слоя грунта в лотке с внутренним размером  $80 \times 48$  см и прозрачными стенками из органического стекла толщиной 3 см составляла 21 см.

Передача нагрузки на грунт осуществлялась через штамп. Штамп представлял собой металлическую пластину  $100 \times 100 \times 3$  мм, моделирующую фундамент конечной жесткости. Нагрузка на штамп передавалась при помощи загрузочного устройства, представляющего собой металлическую рамку, к нижней части которой ступенями прикладывалась нагрузка.

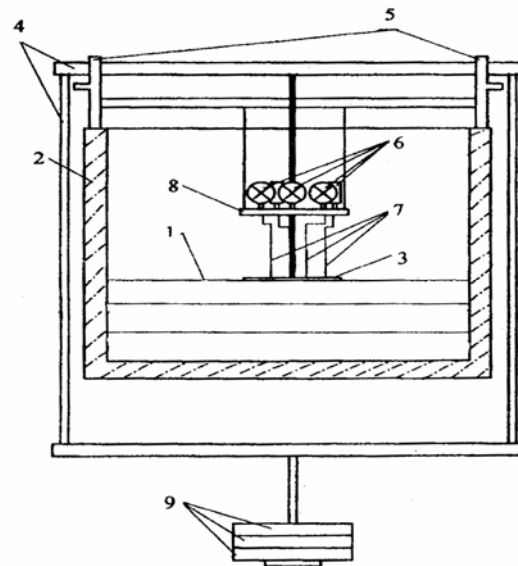


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – трехслойное основание; 2 – пространственный лоток; 3 – жесткий прямоугольный штамп; 4 – устройство для загрузки основания; 5 – ограничители; 6 – индикаторы перемещений часового типа; 7 – спицы; 8 – реперная плита; 9 – нагрузка

Перед началом эксперимента в месте опирания штампа на грунт для равномерной передачи нагрузки насыпался слой песка толщиной 5 мм. Штамп устанавливался на подсыпку и тщательно притирался с целью обеспечения плотного контакта поверхности штампа с основанием. Индикаторы соприкасались со штампом посредством вкрученных в них спиц. Сами индикаторы крепились к реперной плите. Реперная плита представляет собой алюминиевую плиту с размерами  $23,5 \times 21,5$  см и 5 мм толщиной. Она подвешивалась при помощи четырех спиц диаметром 3 мм и длиной 40 см. Это расстояние обеспечивает удаление реперной плиты от штампа, при этом механизм индикаторов перемещения находился в максимально сжатом положении.

При расчете МКЭ получены значения перемещений и напряжений, которые представлены на рис. 3 и 4. При сравнении данных показателей крена с экспериментальными данными [12] в табл. получено незначительное расхождение (до 11 %).

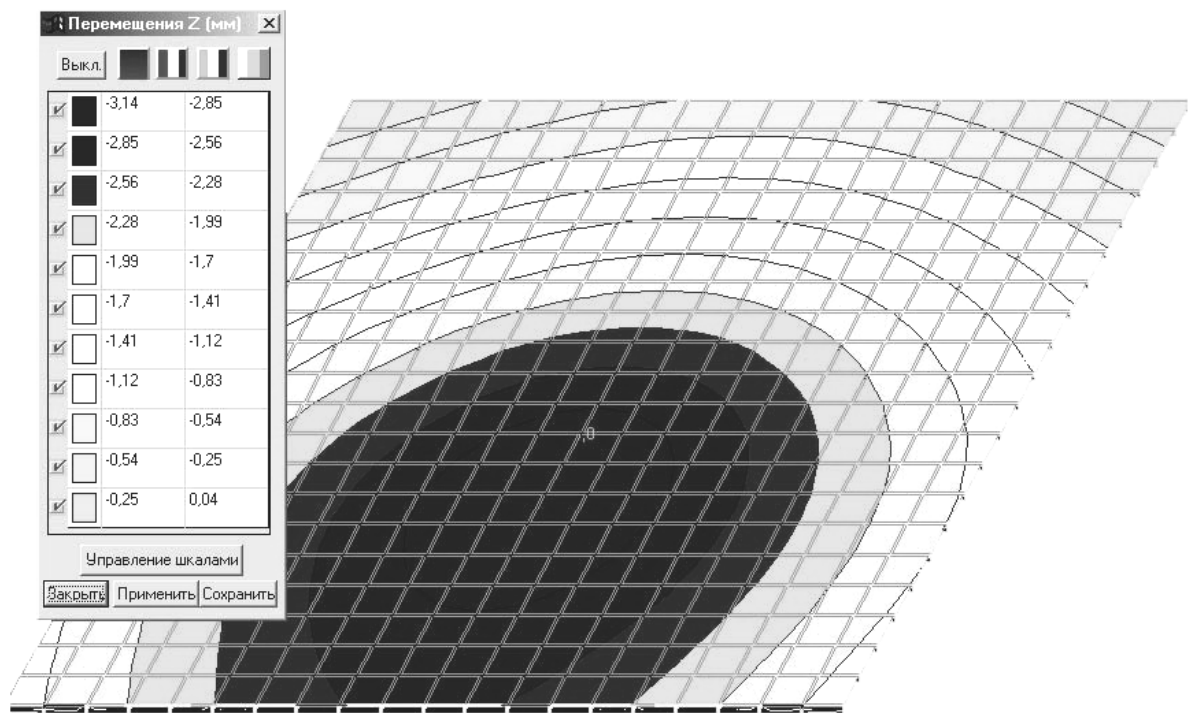


Рис. 3. Схема вертикальных перемещений в изолиниях

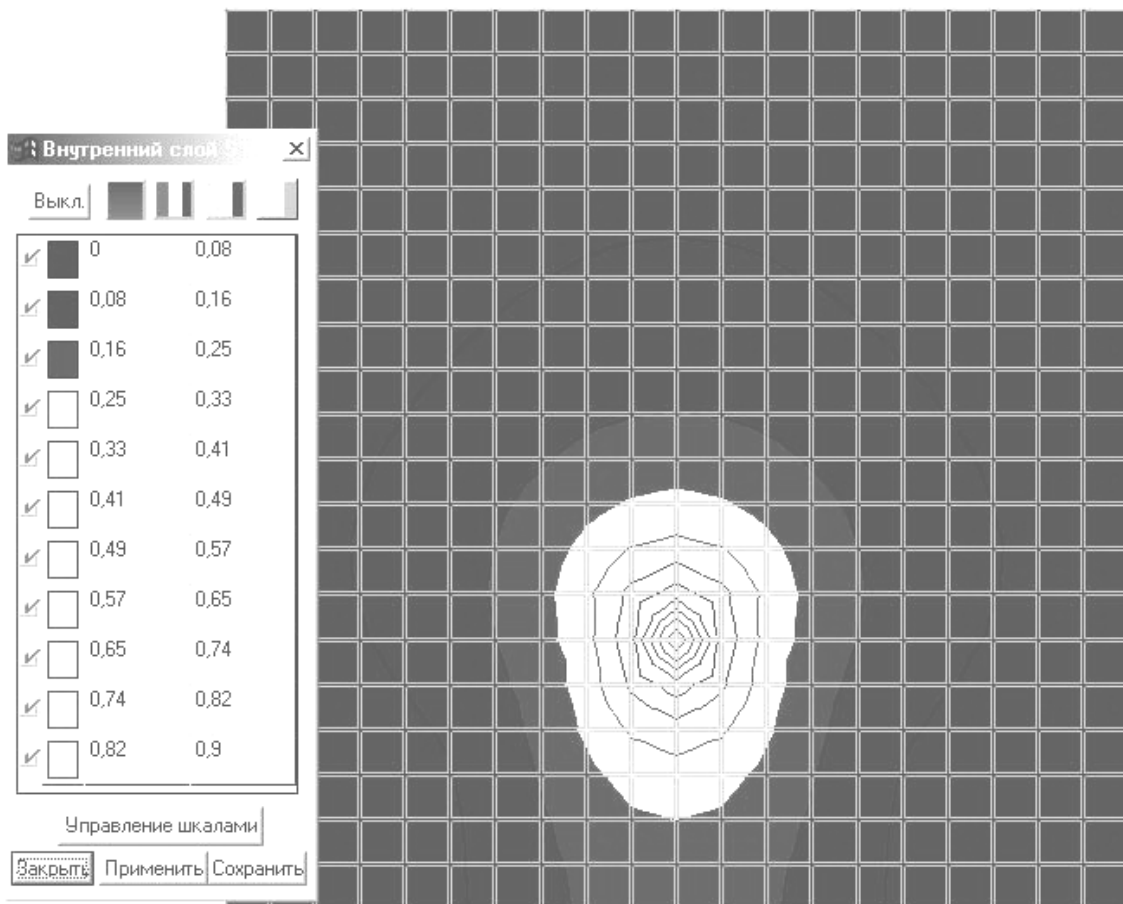


Рис. 4. Напряжения по внутреннему слою для заданного давления

Таблица

**Сравнение показателей крена фундамента на трехслойном основании для давления 25 кПа**

Виды исследований	Эксцентриситет		
	5 мм	10 мм	15 мм
Эксперимент	0,074	0,142	0,276
SCAD	0,176	0,233	0,381
$\Delta$ , %	10,200	9,100	10,500

Из рис. 4 видно, что при нагрузке, приложенной с эксцентриситетом, явно виден характер неравномерного распределения перемещений в металлическом жестком штампе. Причем напряжения убывают от точки приложения нагрузки симметрично относительно продольной оси, вызывая наибольшие напряжения (см. рис. 3) в окрестности приложения силы с эксцентриситетом. Характер изолиний напряжений явно несимметричен, что объясняется влиянием перемещений деформированного слоя грунта под жестким штампом, которые также несимметричны. Представленный анализ напряжений и деформаций на основе новой модели с использованием комплекса SCAD позволил более полно отразить взаимодействие штампа или фундамента со слоистым или неоднородным основанием, причем полученные результаты отличаются высокой степенью адекватности лабораторным или реальным условиям.

### Выводы

1. Модель для расчета осадки и крена с помощью SCAD практически идентична экспериментальной модели, в которой учтены жесткостные параметры как основания, так и модели штампа.

2. Расчет с помощью МКЭ может наиболее полно предоставить информацию о НДС слоистых оснований со сложной структурой залегания слоев, при этом их нелинейные свойства, характер взаимодействия друг с другом могут быть отражены в достаточной мере. Но при этом объем полученных ранее решений недостаточен и его обоснованность с позиций механики грунтов еще вызывает вопросы.

3. Доказано, что учет специфики примыкания штампа к грунтовому основанию (песчаная подсыпка в эксперименте и слой с низкими жесткостными показателями в математической модели) должен учитываться для получения более адекватной картины распределения ис-

комых параметров. Причем, кроме расчета крена возможно проводить достаточно точный расчет развития напряжений в грунте.

4. Как видно из сравнительного анализа (табл. 1), значения крена при одинаковом эксцентриситете и одинаковом давлении отличаются незначительно, что свидетельствует об адекватности применения прикладной программы SCAD для расчета МКЭ осадки и крена фундамента на слоистых, структурно неустойчивых и неоднородных основаниях.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черний Г. І. Геотехнічні процеси в складних ґрунтових умовах України / Г. І. Черний, В. Г. Черний. Світ геотехніки. – 2000. – С. 4–9.
2. Ухов С. Б. Механика грунтов, основания и фундаменты: Учебник / С. Б. Ухов, В. В. Семенов, В. В. Знаменский и др. – М.: АСВ, 1994. – 577 с.
3. Шаповал В. Г. Прогноз осадок и кренов фундаментов на пылевато-глинистом основании, под воздействием статической и циклической нагрузки: Дис. ... д-ра техн. наук. – Д., 1996. – 352 с.
4. Вялов С. С. Осадки и контактные давления нелинейно-деформируемого основания при полосовой нагрузке // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1977. – № 6. – С. 15–20.
5. Гольдштейн М. Н. Расчеты осадок и прочности оснований зданий и сооружений. – К.: Будівельник, 1977. – 208 с.
6. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
7. Большаков В. И. Основы метода конечных элементов / В. И. Большаков, Е. А. Яценко, Г. Соссу и др. – Д.: ПГАСиА, 2000. – 255 с.
8. Стренг Г. Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс; Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 350 с.
9. Васильков Г. В. Приложение МКЭ к решению задач теории сооружений на упругом основании / Г. В. Васильков, Г. А. Рапопорт // Метод конечных элементов в строительной механике: Сб. науч. тр. – Горький: Горьковский ун-т им. Н. И. Лобачевского, 1975. – С. 86–94.
10. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 542 с.
11. Андреев В. С. Модель расчета крена жестких прямоугольных фундаментов на упругом основании // Новини науки Придніпров'я. – Д., 2003. – № 4. – С. 52–55.
12. Андреев В. С. Изучение кренов жестких прямоугольных фундаментов во времени и при циклическом нагружении на многослойном основании // Будівельні конструкції: Міжвід. зб. наук. праць. – К.: НДІБК, 2000. – Вип. 53, кн. 1. – С. 302–306.

Поступила в редколлегию 02.06.04.